

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problems Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



1

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Off nl ungsschrift  
⑩ DE 197 10 687 A 1

⑤1 Int. Cl. 6:  
G 05 B 17/02  
H 04 B 17/00  
G 08 F 17/14  
// G 01 R 29/08, 31/00

②1 Aktenzeichen: 197 10 687.0  
②2 Anmeldetag: 14. 3. 97  
②3 Offenlegungstag: 16. 10. 97

DE 197 10 687 A 1

③0 Unionspriorität:

8-088213 10.04.98 JP

⑦1 Anmelder:

Fujitsu Ltd., Kawasaki, Kanagawa, JP

⑦4 Vertreter:

Mitscherlich & Partner, Patent- und Rechtsanwälte,  
80331 München

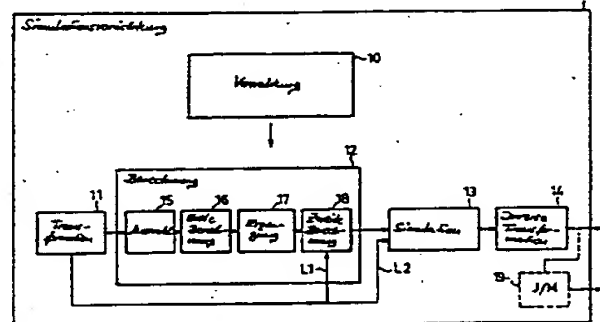
⑦2 Erfinder:

Otsu, Shinichi, Kawasaki, Kanagawa, JP; Mukai,  
Makoto, Kawasaki, Kanagawa, JP

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Simulationsvorrichtung und Simulationsverfahren für die Intensität eines elektromagnetischen Feldes mit Hilfe der Momentenmethode

⑤7 Simulationsvorrichtung (1), die die Momentenmethode verwendet und mit der die Intensität eines elektromagnetischen Feldes etc. im Zeitbereich mit hoher Geschwindigkeit simuliert werden kann. Die Simulationsvorrichtung (1) umfaßt Transformationsmittel (11) zum Auffinden eines Frequenzspektrums, indem eine zeitliche Datenfolge einer Wellenquelle unterteilt und darauf die Fourier-Transformation angewendet wird, Berechnungsmittel (12) zum Berechnen der gegenseitigen Impedanz für eine Abtastfrequenz, Ermitteln einer Näherungsgleichung für die gegenseitige Impedanz ( $Z_1$ ) anhand der berechneten gegenseitigen Impedanz und der Abtastfrequenz, und zum Berechnen der gegenseitigen Impedanz für bestimmte von den Transformationsmitteln (11) vorgegebene Frequenzen anhand der Näherungsgleichung, Simulationsmittel (13) zum Ermitteln des in jedem Element fließenden Stromspektrums durch Anwendung der Momentenmethode anhand der durch die Berechnungsmittel (12) berechneten gegenseitigen Impedanz und des von den Transformationsmitteln (11) vorgegebenen Frequenzspektrums, und zum Ermitteln eines Spannungsspektrums, eines elektrischen Feldspektrums und eines magnetischen Feldspektrums anhand des Stromspektrums, und Inverse-Transformationsmittel (14) zum Anwenden der inversen Fourier-Transformation auf die von den Simulationsmitteln (13) ermittelten Spektren und zum Ausgeben des Ergebnisses.



DE 197 10 687 A 1

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Simulationsvorrichtung und ein Simulationsverfahren zum Simulieren der Intensität eines von einer elektronischen Vorrichtung abgestrahlten elektromagnetischen Feldes etc. mit Hilfe der Momentenmethode, insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung eine Simulationsvorrichtung und ein die Momentenmethode anwendendes Simulationsverfahren, womit die Intensität eines elektromagnetischen Feldes etc. im Zeitbereich mit einer hohen Geschwindigkeit simuliert werden kann.

Die Abstrahlung ungewünschter Radiowellen oder von Rauschen durch elektronische Vorrichtungen wurde auf bestimmte zulässige Pegel beschränkt. Diesbezüglich wurden von den einzelnen Staaten strenge Normen oder Vorschriften aufgestellt.

Zur Erfüllung derartiger Radiowellenvorschriften werden verschiedene Gegenmessungen, wie z. B. bei der Abschirmungs- oder Filtertechnik, angewendet. Werden derartige Gegenmessungen angewendet, ist die Entwicklung einer Simulationstechnik erforderlich, um quantitativ den Verringerungsgrad der Radiowellen oder des Rauschens simulieren zu können.

Ebenso wurde die Beeinflussung elektronischer Vorrichtungen durch von anderen elektronischen Vorrichtungen abgestrahlte Radiowellen oder Rauschen auf einen bestimmten zulässigen Pegel beschränkt, der höher als der oben genannte festgelegte Pegel ist. Auch diesbezüglich wurden von den einzelnen Staaten strenge Normen oder Vorschriften aufgestellt.

Um diese Radiowellenvorschriften erfüllen zu können, ist die Entwicklung einer Simulationstechnik erforderlich, so daß die Gründe dafür ermittelt werden können, warum elektronische Vorrichtungen ungewünschte Radiowellen oder ungewünschtes Rauschen abstrahlen und warum Fehlfunktionen von elektronischen Vorrichtungen aufgrund der Radiowellen oder des Rauschens auftreten.

Zur Entwicklung der zuletzt genannten Simulationstechnik ist eine Vorrichtung zur Berechnung der Intensität eines elektromagnetischen Feldes erforderlich, womit die Intensität eines sich zeitlich ändernden elektromagnetischen Feldes simulieren werden kann. Eine derartige Vorrichtung zur Berechnung der Intensität eines elektrischen Feldes, um die Intensität eines sich zeitlich ändernden elektromagnetischen Feldes berechnen zu können, ist jedoch bisher noch nicht in die Praxis umgesetzt worden. Nachfolgend werden die Gründe hierfür erläutert.

Die Intensität eines von einem beliebig geformten Objekt abgestrahlten elektromagnetischen Feldes kann auf einfache Weise mit Hilfe bekannter theoretischer Gleichungen berechnet werden, falls der in jedem Teil des Objekts fließende elektrische und magnetische Strom bekannt sind. Die Werte des elektrischen und magnetischen Stromes können bei vorgegebenen Randbedingungen durch Lösen der elektromagnetischen Maxwell'schen Gleichungen erhalten werden.

Ein Verfahren zum Lösen dieser Gleichungen ist die Momentenmethode. Die Momentenmethode ist eines der Verfahren zum Lösen von aus den elektromagnetischen Maxwell'schen Gleichungen abgeleiteten Integrationsgleichungen, wobei die Momentenmethode der elektrischen und magnetischen Strom berechnet, indem das Objekt in kleine Elemente aufgeteilt wird, so daß mit der Momentenmethode jedes beliebige dreidimensional geformte Objekt behandelt werden kann. Eine die Momentenmethode beschreibende Druckschrift ist beispielsweise "Sinusoidal Reaction Formulation For Radiation And Scattering From Conducting Surface", H. N. Wang, J. H. Richmond und M. C. Gilreath, IEEE TRANSACTIONS ANTENNAS PROPAGATION, vol. AP-23, 1975.

Andererseits ist eine Analyse im Zeitbereich erforderlich, um die Gründe dafür ermitteln zu können, warum eine elektronische Vorrichtung ungewünschte Radiowellen oder ein ungewünschtes Rauschen abstrahlt und warum bei einer elektronischen Vorrichtung eine Fehlfunktion aufgrund von Radiowellen oder Rauschen auftritt, da die meisten Fehlfunktionen von elektronischen Vorrichtungen durch pulsähnliches Rauschen verursacht werden. Des weiteren werden häufig Fehlfunktionen von elektronischen Vorrichtungen durch einen abnormalen Betrieb von in den Vorrichtungen enthaltenen Bauteilen, wie z. B. ICs, verursacht. Diese Bauteile müssen zeitlich überwacht werden, um einen abnormalen Betrieb dieser Bauteile feststellen zu können.

Zwei nützliche Verfahren zur Analyse im Zeitbereich sind die finite Elementenmethode und die finite Differenzenmethode. Obwohl mit der finiten Elementenmethode und der finiten Differenzenmethode eine Analyse im Zeitbereich möglich ist, können mit diesen Verfahren elektronische Vorrichtungen, die eine Vielzahl von Strukturen wie z. B. Übertragungsleitungen, Kabel und Gehäuse usw. aufweisen, nur schwer behandelt werden.

Der Grund hierfür ist die Tatsache, daß bei der finiten Elementenmethode und der finiten Differenzenmethode das Objekt und der das Objekt umgebende dreidimensionale Raum unterteilt werden müssen. Werden kleine Teile, wie z. B. Kabelendbereich, sehr fein unterteilt, wird die Anzahl der Unterteilungen enorm hoch, da der das Gehäuse und die Kabel umgebende Raum sehr groß ist, was jedoch zu einer Überbelastung der internen Speicherkapazitäten des Computers führt. Wird hingegen für die Kabel, das Gehäuse oder für andere Strukturen lediglich eine grobe Unterteilung durchgeführt, kann der Einfluß von Kabelendbereichen unmöglich analysiert werden, die jedoch in dem Gesamtmechanismus eine bedeutende Rolle spielen und wichtige Quellen für ungewünschte Radiowellen oder ungewünschtes Rauschen darstellen.

Des weiteren wird als Koordinatensystem für die finite Elementenmethode und die finite Differenzenmethode gewöhnlich das kartesische Koordinatensystem verwendet. Die Kabel und Kabelendbereiche, die in dem Gesamtmechanismus eine bedeutende Rolle spielen, umfassen jedoch zylindrische Elemente, während das Gehäuse der Vorrichtung beliebig geformt sein kann. Somit entsteht das schwer zu lösende Problem, wie das zu analysierende Objekt unterteilt werden soll.

Diese Probleme bestehen bei der Momentenmethode nicht, und die Momentenmethode ist zur Behandlung von elektronischen Vorrichtungen, die eine Vielzahl von Strukturen wie z. B. Übertragungsleitungen, Kabel oder Gehäuse umfassen, bestens geeignet.

Der Grund hierfür ist die Tatsache, daß die Momentenmethode eine Art Begrenzungs-elementenmethode ist, bei der lediglich die Begrenzungsfläche zweidimensional unterteilt werden muß. Des weiteren kann der

Unterteilungsgrad vergleichsweise frei gewählt werden, so daß die kleineren Teile fein und die Kabel und das Gehäuse grob unterteilt werden können und im Vergleich zu der finiten Elementenmethode und der finiten Differenzenmethode eine weit aus geringere Anzahl von Unterteilungen ausreichend ist. Da jede Unterteilungsform verwendet werden kann, besteht zudem nicht das oben genannte Problem der Realisierung der Unterteilung.

Demzufolge können Rauschströme, Rauschspannungen und Strahlungsintensitäten von sich zeitlich ändernden elektromagnetischen Feldern mit Hilfe der Momentenmethode simuliert werden. Ist eine sich zeitlich ändernde Wellenquelle vorgegeben, kann die Wellenquelle in den Frequenzbereich transformiert, die Strahlungsintensitäten des entsprechenden elektromagnetischen Feldes in dem Transformations-Frequenzbereich simuliert und die Simulationswerte in den Zeitbereich invertiert transformiert werden.

Auch diese Verfahren kann jedoch nicht mit der verfügbaren Technik realisiert werden, da die Momentenmethode bei einer vorgegebenen Frequenz gegenseitige Impedanzen, gegenseitige Admittanzen und Wechselwirkungen zwischen gitterähnlichen Elementen berechnet und unter Verwendung der berechneten Werte Simulationsgleichungen löst, wobei jedoch die für die Berechnung der gegenseitigen Impedanz usw. benötigte Zeit lang ist und gleichzeitig bei der Transformation von dem Zeitbereich in den Frequenzbereich eine vergleichsweise hohe Anzahl von Frequenzen benötigt wird. Da die gegenseitige Impedanz usw. bei entsprechenden Frequenzen berechnet werden muß, ist die benötigte Verarbeitungszeit enorm hoch.

Wird die Strahlungsintensität eines elektromagnetischen Feldes mit Hilfe der Momentenmethode berechnet, wird — wie nachfolgend noch unter Bezugnahme auf die Zeichnung erläutert wird — sehr viel Zeit sowohl für die Berechnung der gegenseitigen Impedanzen als auch für die Berechnung der gegenseitigen Admittanzen und der Wechselwirkungen benötigt. Zudem kann die Berechnung nicht innerhalb einer in der Praxis verträglichen Zeit realisiert werden, da die Berechnung für bestimmte Frequenzen des Frequenzbereiches durchgeführt werden muß.

In anderen Worten bedeutet dies, daß die für die Berechnung der gegenseitigen Impedanzen, gegenseitigen Admittanzen und Wechselwirkungen benötigte Zeit im Bereich einiger Stunden liegen kann, da die für die Lösung der Simulationsgleichungen mit Hilfe der Momentenmethode bei einer einzigen Frequenz benötigte Zeit bereits einige Minuten beträgt. Da die gegenseitige Impedanz usw. für bestimmte Frequenzen des Frequenzbereiches berechnet werden muß, kann die Berechnung nicht innerhalb eines verträglichen Zeitrahmens abgeschlossen werden.

Es wird darauf hingewiesen, daß die gegenseitige Impedanz die Beziehung zwischen dem durch den in einem Element fließenden Strom induzierten elektrischen Feld und dem in einem anderen Element fließenden Strom beschreibt. Die gegenseitige Admittanz gibt die Beziehung zwischen dem durch den in einem Element fließenden magnetischen Strom induzierten magnetischen Feld und dem in einem anderen Element fließenden magnetischen Strom an. Die Wechselwirkung beschreibt den Zusammenhang zwischen dem durch den in einem Element fließenden elektrischen Strom (bzw. magnetischen Strom) induzierten magnetischen Feld (bzw. elektrischen Feld) und dem in einem anderen Element fließenden magnetischen Strom (bzw. elektrischen Strom). Elektrische Ströme fließen durch Metalle, während magnetische Ströme an der Oberfläche von dielektrischen Körpern fließen.

Wie aus der vorhergehenden Beschreibung ersichtlich ist, wurde bisher in der Praxis noch keine Vorrichtung zur Berechnung der Intensität eines elektromagnetischen Feldes entwickelt, welche die Intensität eines elektromagnetischen Feldes simulieren und Einrichtungen wie z. B. gedruckte Leiterplatten, Kabel oder Gehäuse analysieren kann.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine Simulationsvorrichtung und ein Simulationsverfahren zu schaffen, wobei mit Hilfe einer neuen Momentenmethode die Intensität eines sich mit hoher Geschwindigkeit zeitlich ändernden elektromagnetischen Feldes usw. berechnet werden kann.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch eine Simulationsvorrichtung nach den Ansprüchen 1, 2 oder 10 und ein Simulationsverfahren nach den Ansprüchen 12, 13 oder 15 gelöst.

Die Unteransprüche beschreiben vorteilhafte Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher beschrieben.

Fig. 1 zeigt das Prinzip und den Aufbau der vorliegenden Erfindung.

Fig. 2 zeigt eine weitere Darstellung des Prinzips und des Aufbaus der vorliegenden Erfindung.

Fig. 3 zeigt eine erste Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung einer Näherungsgleichung.

Fig. 4A und 4B zeigen zweite Darstellungen zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 5A und 5B zeigen dritte Darstellungen zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 6 zeigt eine vierte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 7 zeigt eine fünfte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 8 zeigt eine sechste Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 9 zeigt eine siebte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 10 zeigt eine achte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 11A, 11B und 11C zeigen neunte Darstellungen zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 12 zeigt eine zehnte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 13A und 13B zeigen elfte Darstellungen zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 14 zeigt eine zwölfte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 15 zeigt eine dreizehnte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 16 zeigt eine vierzehnte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 17 zeigt eine fünfzehnte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 18 zeigt eine sechzehnte Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung der Näherungsgleichung.

Fig. 19 zeigt ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung,

Fig. 20 zeigt ein Ausführungsbeispiel für das Eingeben einer Wellenquelle,

Fig. 21 zeigt eine Darstellung zur Erläuterung des Eingebens einer Wellenquelle,

Fig. 22A und 22B zeigen Darstellungen einer Wellenquellen für einen Impulstest,

Fig. 23A und 23B zeigen weitere Darstellungen der Wellenquelle für den Impulstest,

Fig. 24 zeigt ein Ausführungsbeispiel zur Berechnung eines Näherungswertes,

Fig. 25 zeigt ein Ausführungsbeispiel zur Berechnung eines Oberwellenstromes,

Fig. 26 zeigt Simulationsgleichungen gemäß der Momentenmethode,

Fig. 27 zeigt ein Ausführungsbeispiel zur Berechnung eines Stromes,

Fig. 28 zeigt ein Ausführungsbeispiel zur Berechnung einer Spannung,

Fig. 29 zeigt ein Ausführungsbeispiel zur Berechnung eines elektromagnetischen Feldes,

Fig. 30 zeigt eine erste Darstellung zur Erläuterung der Ermittlung von einer zwischen Leitern anliegenden Spannung,

Fig. 31A, 31B und 31C zeigen zweite Darstellungen zur Erläuterung der Ermittlung der zwischen den Leitern anliegenden Spannung,

Fig. 32 zeigt eine erste Darstellung zur Erläuterung der Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung,

Fig. 33 zeigt eine zweite Darstellung zur Erläuterung der Berechnung der Kopplung der Übertragungsleitung,

Fig. 34 zeigt eine dritte Darstellung zur Erläuterung der Berechnung der Kopplung der Übertragungsleitung,

Fig. 35 zeigt eine vierte Darstellung zur Erläuterung der Berechnung der Kopplung der Übertragungsleitung,

Fig. 36A und 36B zeigen fünfte Darstellungen zur Erläuterung der Berechnung der Kopplung der Übertragungsleitung,

Fig. 37 zeigt eine sechste Darstellung zur Erläuterung der Berechnung der Kopplung der Übertragungsleitung,

Fig. 38 zeigt eine siebte Darstellung zur Erläuterung der Berechnung der Kopplung der Übertragungsleitung,

Fig. 39A und 39B zeigen erste Darstellungen zur Erläuterung der Simulation,

Fig. 40 zeigt eine zweite Darstellung zur Erläuterung der Simulation,

Fig. 41 zeigt Simulationsgleichungen gemäß der Momentenmethode,

Fig. 42 zeigt eine erste Darstellung zur Erläuterung einer Strahlungsanalyse einer Antenne,

Fig. 43 zeigt eine zweite Darstellung zur Erläuterung der Strahlungsanalyse der Antenne,

Fig. 44A und 44B zeigen dritte Darstellungen zur Erläuterung der Strahlungsanalyse der Antenne, und

Fig. 45 zeigt eine Darstellung zur Erläuterung der Momentenmethode.

Bei der Berechnung der Strahlungsintensität eines elektromagnetischen Feldes mit Hilfe der Momentenmethode wird, wie durch das Flußdiagramm von Fig. 45 dargestellt, beim Lesen von Konfigurationsinformationen der zu simulierenden gitterartigen elektronischen Vorrichtung eine bisher noch nicht verarbeitete Frequenz aus den auszuwertenden Frequenzen ausgewählt, und für diese Frequenz werden mit Hilfe eines bestimmten Berechnungsverfahrens die gegenseitige Impedanz, die gegenseitige Admittanz und die Wechselwirkung zwischen den gitterartigen Elementen ermittelt. Die somit ermittelte gegenseitige Impedanz usw. und die durch die Konfigurationsinformationen spezifizierte Wellenquelle werden in den Simulationsgleichungen gemäß der Momentenmethode eingesetzt, und durch Lösen der Simulationsgleichungen wird der in jedem Element fließende elektrische und magnetische Strom ermittelt. Diese Ströme werden anschließend zur Berechnung der Strahlungsintensität an jedem Untersuchungspunkt eines elektromagnetischen Feldes verwendet. Die Berechnung jeder gegenseitigen Impedanz, gegenseitigen Admittanz und jeder Wechselwirkung benötigt jedoch eine lange Zeit, und diese Werte müssen zudem für jede einzelne Frequenz des Frequenzbereiches ermittelt werden. Wie bereits erwähnt, kann somit die Berechnung in der Praxis nicht innerhalb einer kurzen Zeitspanne durchgeführt werden.

Insbesondere beträgt zwar, wie bereits beschrieben, die für die Lösung der Simulationsgleichungen gemäß der Momentenmethode benötigte Zeit für eine einzige Frequenz einige Minuten; die Berechnung der gegenseitigen Impedanz, der gegenseitigen Admittanz und der Wechselwirkung benötigt jedoch einige Stunden. Da diese Werte für jede Frequenz des Frequenzbereiches berechnet werden müssen, kann diese Berechnung nicht innerhalb einer praktisch verträglichen kurzen Zeitspanne durchgeführt werden.

Die vorliegende Erfindung ermöglicht hingegen eine sehr schnelle Simulation der Intensität eines sich zeitlich ändernden elektromagnetischen Feldes usw. Nachfolgend wird die Erfindung detailliert beschrieben. Es sei darauf hingewiesen, daß bei der erfindungsgemäßen Berechnung der Strahlungsintensität eines elektromagnetischen Feldes mit Hilfe der Momentenmethode vorzugsweise eine Technik für die Hochgeschwindigkeitsrealisierung der Momentenmethode zum Einsatz kommt, die bereits zuvor von den Erfindern der vorliegenden Erfindung erfunden und beschrieben worden ist (vgl. Japanische Patentanmeldung 7-298062). Es wird daher zunächst die von den Erfindern der vorliegenden Erfindung erfundene Hochgeschwindigkeitsrealisierung der Momentenmethode erläutert.

Hinsichtlich der Hochgeschwindigkeitsrealisierung der Momentenmethode wird nachfolgend die Frequenz mit  $f$ , die Wellenzahl mit  $k (= 2\pi f/c)$ , wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit angibt) und der grundsätzliche Abstand zwischen einzelnen Elementen mit  $r_0$  bezeichnet.

Die zwischen einem Element  $i$  und einem Element  $j$ , die nach der Momentenmethode aufgeteilt worden sind, auftretende gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  kann durch folgendes Frequenz-Polynom näherungsweise ausgedrückt werden:

$$Z_{ij} = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f^1 + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$$

Die gegenseitige Admittanz  $Y_{ij}$  zwischen den Elementen  $i$  und  $j$  kann ebenfalls durch folgendes Frequenz-

Polynom näherungsweise ausgedrückt werden:

$$Y_{ij} = e^{-j\omega t_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)]$$

Die Wechselwirkung zwischen den Elementen i und j kann schließlich durch folgendes Frequenz-Polynom 5  
näherungsweise dargestellt werden:

$$B_{ij} = e^{-j\omega t_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)]$$

Zunächst werden die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$ , die gegenseitige Admittanz  $Y_{ij}$  und die Wechselwirkung  $B_{ij}$  10  
mit Hilfe eines genauen Berechnungsverfahrens für unterschiedliche Abtastfrequenzen berechnet. Die sich  
daraus ergebenden Berechnungswerte werden in die obigen Näherungsgleichungen eingesetzt, um auf diese  
Weise die Simulationsgleichungen zum Ermitteln der Koeffizienten  $a_p$  und  $b_p$  für jeden weiteren Berechnungs-  
wert aufzustellen, und diese Simulationsgleichungen werden nachfolgend gelöst, um somit die Koeffizienten  $a_p$  15  
und  $b_p$  zu ermitteln. Wird anschließend eine von den zunächst verwendeten Abtastfrequenzen abweichende  
Frequenz vorgegeben, werden die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$ , die gegenseitige Admittanz  $Y_{ij}$  und die Wechsel-  
wirkung  $B_{ij}$  jeweils mit Hilfe der obigen Näherungsgleichungen unter Verwendung der zuvor ermittelten  
Koeffizienten  $a_p$  und  $b_p$  berechnet. Auf diese Weise kann die Momentenmethode mit hoher Geschwindigkeit  
realisiert und implementiert werden.

Es sei darauf hingewiesen, daß die Anzahl der zunächst verwendeten Frequenzen davon abhängig ist, wieviele 20  
Koeffizienten  $a_p$  und  $b_p$  der Näherungsgleichungen ermittelt werden sollen. Werden beispielsweise fünf Abtast-  
frequenzen verwendet, können die Koeffizienten  $a_0$  bis  $a_4$  und  $b_0$  bis  $b_4$  ermittelt werden.

Wie nachfolgend erläutert wird, wird erfindungsgemäß ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem eine sich zeitlich 25  
ändernde Wellenquelle zunächst in den Frequenzbereich transformiert, anschließend die Momentenmethode  
zur Simulation des Strom- oder Spannungsverlaufes der einzelnen Elemente sowie der Strahlungsintensität des  
elektromagnetischen Feldes in dem Transformations-Frequenzbereich verwendet und schließlich die Simula-  
tionswerte in den Zeitbereich wieder zurück- bzw. invertransformiert werden. Wird dabei die oben beschriebene  
Hochgeschwindigkeitsrealisierung der Momentenmethode eingesetzt, kann die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$ , die  
gegenseitige Admittanz  $Y_{ij}$  und die Wechselwirkung  $B_{ij}$  sehr schnell berechnet werden, so daß die Momenten- 30  
methode mit hoher Geschwindigkeit ausgeführt werden kann.

Auf diese Weise kann innerhalb kurzer Zeit festgestellt werden, warum eine elektronische Vorrichtung  
ungewünschte Radiowellen oder ungewünschtes Rauschen abstrahlt und warum eine Fehlfunktion einer elek-  
tronischen Vorrichtung aufgrund von Radiowellen oder Rauschen auftritt.

Das Prinzip sowie der grundsätzliche Aufbau der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend unter Bezug- 35  
nahme auf Fig. 1 und 2 erläutert.

In diesen Figuren bezeichnet das Bezugszeichen 1 eine erfindungsgemäße Simulationsvorrichtung. Diese  
Vorrichtung teilt eine elektronische Vorrichtung in einzelne Elemente auf, berechnet für eine vorgegebene  
Frequenz die zwischen den Elementen auftretende gegenseitige Impedanz, gegenseitige Admittanz und Wech-  
selwirkung und simuliert gemäß der Momentenmethode aufgrund der berechneten Werte die in jedem Element  
fließenden elektrischen und magnetischen Ströme sowie die den Elementen entsprechende Wellenquelle. 40

Die in Fig. 1 dargestellte erfindungsgemäße Simulationsvorrichtung 1 umfaßt Verwaltungsmittel 10, Transfor-  
mationsmittel 11, Berechnungsmittel 12, Simulationsmittel 13 und Inverse-Transformationsmittel 14.

Die Verwaltungsmittel 10 verwalten die Konfigurationsinformationen der zu analysierenden elektronischen  
Vorrichtung, welche zur Simulation in eine Vielzahl einzelner Elemente aufgeteilt worden ist. Die Transfor-  
mationsmittel 11 teilen die zeitabhängigen Daten der Wellenquelle in eine zeitliche Datenfolge auf und führen die 45  
Fouriertransformation durch, um auf diese Weise das entsprechende Frequenzspektrum zu erhalten. Die Trans-  
formationsmittel 11 legen das gesamte Frequenzspektrum oder ein Teil des Frequenzspektrums bzw. die  
entsprechenden Frequenzen als Simulationsobjekt fest.

Die Berechnungsmittel 12 umfassen Auswahlmittel 15, um unter Berücksichtigung der von den Transfor-  
mationsmitteln 11 festgelegten Frequenzen eine Abtastfrequenz auszuwählen, sowie erste Berechnungsmittel 16 50  
zur Berechnung der gegenseitigen Impedanz, der gegenseitigen Admittanz und der Wechselwirkung für die von  
den Auswahlmitteln 15 ausgewählte Abtastfrequenz. Des weiteren weisen die Berechnungsmittel 12 Erzeu-  
gungsmittel 17 auf, um eine Näherungsgleichung für die gegenseitige Impedanz auf Grundlage der Abtastfre-  
quenz und der von den ersten Berechnungsmitteln 16 für die Abtastfrequenz berechneten gegenseitigen Impe-  
danz, eine Näherungsgleichung für die gegenseitige Admittanz auf Grundlage der Abtastfrequenz und der von 55  
den ersten Berechnungsmitteln 16 für die Abtastfrequenz berechneten gegenseitigen Admittanz und eine  
Näherungsgleichung für die Wechselwirkung auf Grundlage der Abtastfrequenz und der von den ersten Berech-  
nungsmitteln 16 für die Abtastfrequenz berechneten Wechselwirkung zu erzeugen. Die Berechnungsmittel 12  
umfassen schließlich auch zweite Berechnungsmittel 18, um für weitere von den Transformationsmitteln vorge-  
gebene Frequenzen mit Hilfe der durch die Erzeugungsmittel 17 erzeugten Näherungsgleichungen die gegensei- 60  
tige Impedanz, die gegenseitige Admittanz und die Wechselwirkung zu berechnen.

Die Simulationsmittel 13 ermitteln aufgrund der von den Berechnungsmitteln 12 berechneten Werte für die  
gegenseitige Impedanz, gegenseitige Admittanz und Wechselwirkung sowie aufgrund des von den Transfor-  
mationsmitteln 11 vorgegebenen Frequenzspektrums mit Hilfe der Momentenmethode das in den einzelnen  
Elementen fließenden elektrische und magnetische Stromspektrum. Gleichzeitig ermitteln die Simulationsmittel 65  
13, falls gewünscht, abhängig von dem elektrischen Stromspektrum und magnetischen Stromspektrum das  
entsprechende Spannungs-, elektrische Feld- und magnetische Feldspektrum und legen fest, welche gewünsch-  
ten Frequenzen des ermittelten Spektrums ausgegeben werden sollen. Die Inverse-Transformationsmittel 14

transformieren mit Hilfe der inversen Fouriertransformation das von den Simulationsmitteln 13 ausgegebene Frequenzspektrum in den Zeitbereich und geben das Ergebnis aus.

Die Simulationsmittel 13 führen somit gegebenenfalls die Simulation durch, um abhängig von einem entsprechenden Befehl einer Bedienerperson lediglich das elektrische und magnetische Stromspektrum zu ermitteln. In diesem Fall können mit Hilfe der in Fig. 1 gezeigten J/M-Mittel 19 die entsprechende Spannung und das entsprechende elektrische und magnetische Feld im Zeitbereich abhängig von dem im Zeitbereich vorliegenden und von den Inverse-Transformationsmitteln 14 ausgehenden elektrischen und magnetischen Strom ermittelt werden.

Nachdem die Transformationsmittel 11 durch Unterteilen der in zeitlicher Folge vorliegenden Daten der Wellenquelle und Durchführen der Fouriertransformation das Frequenzspektrum erhalten und das gesamte Frequenzspektrum oder einen Teil davon sowie die entsprechenden Frequenzen für die nachfolgende Verarbeitung festgelegt haben, wählen die Auswahlmittel 15 der erfindungsgemäßen Simulationsvorrichtung 1 unter Berücksichtigung der von den Transformationsmitteln 11 vorgegebenen Frequenzen eine Abtastfrequenz aus, und die ersten Berechnungsmittel 16 berechnen mit Hilfe eines genauen Algorithmus die gegenseitige Impedanz, die gegenseitige Admittanz und die Wechselwirkung für die von den Auswahlmitteln 15 ausgewählte Abtastfrequenz.

Anschließend ermitteln die Erzeugungsmittel 17 die Simulationsgleichungen, wobei die Koeffizienten  $a_p$  und  $b_p$  unbekannte Größen darstellen, indem die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  beispielsweise durch folgenden Ausdruck näherungsweise beschrieben wird

$$Z_{ij} = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f^1 + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$$

(wobei  $f$  die Frequenz,  $k$  die Wellenzahl und  $r_0$  den Abstand zwischen den Elementen  $i$  und  $j$  darstellt) und die Abtastfrequenz und die von den ersten Berechnungsmitteln 16 berechnete gegenseitige Impedanz in diese Näherungsgleichung eingesetzt und die sich daraus ergebenden Gleichungen gelöst werden.

Des weiteren ermitteln die Erzeugungsmittel 17 die Simulationsgleichungen, wobei die Koeffizienten  $a_p$  und  $b_p$  unbekannte Größen darstellen, indem die gegenseitige Admittanz  $Y_{ij}$  beispielsweise durch folgenden Ausdruck näherungsweise beschrieben wird

$$Y_{ij} = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f^1 + b_1 f + b_2 f^3 + b_3 f^5 + b_4 f^7 + \dots)]$$

(wobei  $f$  die Frequenz,  $k$  die Wellenzahl und  $r_0$  den Abstand zwischen den Elementen  $i$  und  $j$  darstellt) und die Abtastfrequenz und die von den ersten Berechnungsmitteln 16 berechnete gegenseitige Impedanz in diese Näherungsgleichung eingesetzt und die sich daraus ergebenden Gleichungen gelöst werden.

Schließlich ermitteln die Erzeugungsmittel 17 auch die Simulationsgleichungen mit den Koeffizienten  $a_p$  und  $b_p$  als Unbekannte, indem die Wechselwirkung  $B_{ij}$  beispielsweise durch folgenden Ausdruck näherungsweise beschrieben wird

$$B_{ij} = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f^1 + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)]$$

(wobei  $f$  die Frequenz,  $k$  die Wellenzahl und  $r_0$  den Abstand zwischen den Elementen  $i$  und  $j$  darstellt) und die Abtastfrequenz und die von den ersten Berechnungsmitteln 16 berechnete Wechselwirkung in diese Näherungsgleichung eingesetzt und die sich daraus ergebenden Gleichungen gelöst werden.

Nachdem auf diese Weise die Näherungsgleichungen für die gegenseitige Impedanz, die gegenseitige Admittanz und die Wechselwirkung bestimmt worden sind, berechnen die zweiten Berechnungsmittel 18 für jede weitere von den Transformationsmitteln 11 vorgegebene Frequenz die entsprechende gegenseitige Impedanz, gegenseitige Admittanz und Wechselwirkung durch Anwendung dieser drei Näherungsgleichungen (über den in Fig. 1 dargestellten Pfad L1). Nach Berechnung dieser Werte ermitteln die Simulationsmittel 13 mit Hilfe der Momentenmethode aufgrund der berechneten gegenseitigen Impedanz, gegenseitigen Admittanz und Wechselwirkung sowie aufgrund des von den Transformationsmitteln 11 festgelegten Frequenzspektrums das Spektrum des in jedem Element fließenden elektrischen und magnetischen Stromes (über den in Fig. 1 dargestellten Pfad L2).

Anschließend bestimmen bzw. spezifizieren die Simulationsmittel 13 dasjenige Spektrum des elektrischen und magnetischen Stromes der ermittelten Stromspektren, für welches die Simulation gewünscht wird bzw. welches für die weitere Verarbeitung verwendet werden soll, sowie das Spektrum der Spannung und des elektrischen sowie magnetischen Feldes, für welches die Simulation gewünscht wird, und geben diese Spektren aus bzw. bestimmen diese Spektren für die Ausgabe. Die Inverse-Transformationsmittel 14 transformieren die ausgegebenen Spektren mit Hilfe der inversen Fouriertransformation in den Zeitbereich und geben das Ergebnis aus.

Auf diese Weise werden durch die in Fig. 1 gezeigte Simulationsvorrichtung der vorliegenden Erfindung die gegenseitige Impedanz, gegenseitige Admittanz und Wechselwirkung mit hoher Geschwindigkeit durch Anwendung der Näherungsgleichungen berechnet. Somit kann bei einer sich zeitlich ändernden Wellenquelle diese in den Frequenzbereich transformiert und die Intensität des elektromagnetischen Feldes etc. mit Hilfe der Momentenmethode in dem Frequenzbereich simuliert werden, wobei anschließend die Simulationsergebnisse in den Zeitbereich zurücktransformiert werden.

Mit Hilfe der erfindungsgemäßen Simulationsvorrichtung 1 kann daher der Einfluß einer Wellenquelle auf eine elektronische Vorrichtung im Zeitbereich simuliert werden, so daß analysiert werden kann, warum eine elektronische Vorrichtung ungewünschte Radiowellen oder ungewünschtes Rauschen abstrahlt und warum in einer elektronischen Vorrichtung eine Fehlfunktion aufgrund von Radiowellen oder Rauschen auftritt.



Die in Fig. 2 gezeigte Simulationsvorrichtung 1 der vorliegenden Erfindung umfaßt hingegen Verwaltungsmittel 20, Trennmittel 21, Simulationsmittel 22, Berechnungsmittel 23 und Ermittlungsmittel 24.

Diese Verwaltungsmittel 20 verwalten die Konfigurationsinformationen einer in Elemente aufgeteilten zu analysierenden elektronischen Vorrichtung. Erzeugt die Wellenquelle ein modulierte Trägersignal, teilen die Trennmittel 21 die Wellenquelle in drei Wellenquellen auf, die jeweils durch die Trägersignalfrequenz und Modulationssignalfrequenz definierte unterschiedliche Frequenzen aufweisen. Die Simulationsmittel 22 simulieren im Frequenzbereich den in jedem Element fließenden elektrischen und magnetischen Strom. Die Frequenz des Trägersignals kann gemäß der CISPR-Norm (International Special Committee on Radio Interference) zwischen 30MHz und 1GHz liegen.

Die Berechnungsmittel 23 berechnen den elektrischen und magnetischen Strom im Zeitbereich. Die Ermittlungsmittel 24 ermitteln aufgrund des von den Berechnungsmitteln 23 berechneten und im Zeitbereich vorliegenden elektrischen und magnetischen Stromes den gewünschten Strom, die gewünschte Spannung bzw. das gewünschte elektrische oder magnetische Feld im Zeitbereich.

Wird als Wellenquelle eine ein Trägersignal modulierende Wellenquelle verwendet, teilen die Trennmittel 21 diese Wellenquelle bei der in Fig. 2 gezeigten erfindungsgemäßen Simulationsvorrichtung 1 in drei Wellenquellen auf, die jeweils unterschiedliche durch die Trägersignalfrequenz und Modulationssignalfrequenz definierte Frequenzen aufweisen. Die Simulationsmittel 22 simulieren durch Anwendung der Momentenmethode auf die durch die Trennmittel 21 aufgeteilten Wellenquellen den in jedem Element fließenden elektrischen und magnetischen Strom im Frequenzbereich.

Die Berechnungsmittel 23 berechnen auf Grundlage der Simulationsergebnisse den dem durch die Simulationsmittel 22 im Frequenzbereich ermittelten elektrischen bzw. magnetischen Strom entsprechenden elektrischen bzw. magnetischen Strom im Zeitbereich. Anschließend ermitteln die Ermittlungsmittel 23 durch gemeinsame Auswertung bzw. Kombination des durch die Berechnungsmittel 23 berechneten elektrischen und magnetischen Stromes den gewünschten Strom bzw. die Spannung oder das elektrische bzw. magnetische Feld im Zeitbereich, wobei die Spannung usw. im Zeitbereich ermittelt wird, indem der im Zeitbereich vorliegende elektrische und magnetische Strom kombiniert werden und das Kombinationsergebnis ausgewertet wird oder der im Zeitbereich vorliegende elektrische und magnetische Strom vor deren Kombination ausgewertet und erst anschließend kombiniert werden.

Wird als Wellenquelle eine ein modulierte Trägersignal ausgebende Wellenquelle verwendet, würde bei der in Fig. 1 gezeigten Simulationsvorrichtung, bei der das Frequenzspektrum durch Unterteilung der in zeitlicher Folge vorliegenden Daten der Wellenquelle und anschließender Anwendung der Fouriertransformation gewonnen wird, die Anzahl der Unterteilungen extrem hoch werden. Daher wird das im Zusammenhang mit Fig. 1 beschriebene Verfahren vorteilhafterweise nicht für eine Wellenquelle verwendet, die ein modulierte Trägersignal ausgibt. Statt dessen wird in diesem Fall erfindungsgemäß die in Fig. 2 gezeigte Simulationsvorrichtung verwendet. Somit kann der in jedem Element fließende elektrische und magnetische Strom auf einfache Weise mit Hilfe der Momentenmethode ermittelt werden.

Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung genauer unter Bezugnahme auf verschiedene Ausführungsbeispiele beschrieben.

Erfindungsgemäß wird ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem — wie bereits oben beschrieben worden ist — unter Anwendung der Momentenmethode die Intensität eines elektromagnetischen Feldes äußerst schnell ermittelt werden kann.

Gemäß diesem Verfahren wird die zwischen einem Element i und einem Element j auftretende gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  wie folgt näherungsweise beschrieben:

$$Z_{ij} = e^{-jk r_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f^1 + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)] \quad 45$$

Die zwischen den Elementen i und j auftretende gegenseitige Admittanz  $Y_{ij}$  wird durch folgenden Ausdruck näherungsweise beschrieben:

$$Y_{ij} = e^{-jk r_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f^1 + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)] \quad 50$$

Die Wechselwirkung  $B_{ij}$  (elektrischer Stromdipol gegenüber magnetischer Stromdipol) zwischen den Elementen i und j wird folgendermaßen näherungsweise beschrieben:

$$B_{ij} = e^{-jk r_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f^1 + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)] \quad 55$$

Dabei bezeichnet f die Frequenz, k die Wellenzahl ( $k = 2\pi f/c$ , wobei c die Lichtgeschwindigkeit angibt) und  $r_0$  den grundsätzlichen Abstand zwischen den Elementen i und j.

Nachfolgend wird obige Näherungsgleichung zur Berechnung der gegenseitigen Impedanz  $Z_{ij}$  mit Hilfe eines Frequenz-Polynoms erläutert.

Zur Erläuterung der Näherungsgleichung für die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  wird ein in Fig. 3 dargestellter Einpol betrachtet. In Fig. 3 ist der Einpol durch eine dicke durchgezogene Linie und die Form von später beschriebenen Ausdehnungsfunktionen  $J_1$  und  $J_2$  durch eine gestrichelte Linie dargestellt. In diesem Fall wird die Neigung zwischen dem Einpol <1> und dem Einpol <3> durch  $\Phi_1$  und die Neigung zwischen dem Einpol <1> und dem Einpol <3> durch  $\Phi_2$  wiedergegeben. In Fig. 3 sind  $\Phi_1$  und  $\Phi_2$  vereinfacht durch  $\Phi$  dargestellt.

Die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  wird allgemein durch die in Fig. 4A gezeigte Gleichung beschrieben. Dabei wird durch  $\omega$  die Kreisfrequenz und durch r die Entfernung beschrieben, wobei gilt:  $p_1 = -1/j\omega \times \partial J_1 / \partial t$  und  $p_2 = -1/j\omega \times \partial J_2 / \partial t$ . Der Grund, warum die Integration in der komplexen s-Ebene ausgeführt wird, ist, daß nicht

nur Fälle von linearen Einpolen (z. B. Drähten oder Leitungen) untersucht werden sollen, sondern auch Fälle von flächig ausgestatteten Einpolen (z. B. Oberflächenbereichen).

$J_1$  und  $J_2$  stellen die Ausdehnungsfunktionen der Momentenmethode dar. Die Ausdehnungsfunktionen beschreiben die Form der Stromverteilung in den Einpolen. Die Ausdehnungsfunktionen unterscheiden sich abhängig von dem Typ der Momentenmethode, wobei jedoch der folgende Beweis für alle Momentenmethoden Gültigkeit besitzt. Als Ausdehnungsfunktion kann sowohl ein sinusförmiger oder ein sägezahnförmiger als auch ein impulsförmiger Stromverlauf verwendet werden. Zudem trifft der nachfolgende Beweis auch unabhängig von einer linearen oder ebenen Form des Einpols zu. Der Beweis wird nachfolgend bezüglich der "stückweisen" sinusförmigen Momentenmethode durchgeführt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, daß die Ausdehnungsfunktionen in Fig. 3 der Einfachheit halber dreieckförmig durch gestrichelte Linien angedeutet sind, während in der folgenden Beschreibung von einem sinusförmigen Stromverlauf ausgegangen wird.

Bei der "stückweisen" sinusförmigen Momentenmethode können die Ausdehnungsfunktionen der in Fig. 3 gezeigten Einpole <1> bis <4> wie folgt ausgedrückt werden. Dabei beschreibt  $d_1, d_2, d_3$  bzw.  $d_4$  die Länge des Einpols <1>, <2>, <3> bzw. <4>.

Elektrischer Stromeinpol <1>:  $J_1 = \text{sink}(z - z_0)/\text{sink}d_1$ ,  
Elektrischer Stromeinpol <2>:  $J_1 = \text{sink}(z_2 - z)/\text{sink}d_2$ ,  
Elektrischer Stromeinpol <3>:  $J_2 = \text{sink}(t - t_0)/\text{sink}d_3$ ,  
Elektrischer Stromeinpol <4>:  $J_2 = \text{sink}(t_2 - t)/\text{sink}d_4$ .

Durch Anwendung dieser Ausdehnungsfunktionen wird zunächst die gegenseitige Impedanz  $Z_{13}$  zwischen den Einpolen <1> und <3> sowie die gegenseitige Impedanz zwischen den Einpolen <1> und <4> ermittelt. Diese gegenseitigen Impedanzen  $Z_{13}$  und  $Z_{14}$  sind in Fig. 4B durch die entsprechenden Gleichungen dargestellt.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Entfernung zwischen Einpolen durch

$$r = (z^2 + t^2 - 2zt\cos\Phi + h^2)^{1/2}$$

ausgedrückt werden kann, ergeben sich für die Koeffizienten dieser gegenseitigen Impedanzen  $Z_{13}$  und  $Z_{14}$  die in Fig. 5A dargestellten Gleichungen. Es ist zu beachten, daß gilt  $\alpha = c/4\pi$  (wobei  $\alpha$  konstant ist).

Des weiteren kann die Entfernung  $r$  zwischen Einpolen folgendermaßen näherungsweise ausgedrückt werden, wobei  $r_0$  die Entfernung zwischen dem Endpunkt des einen Einpols und dem Endpunkt des anderen Einpols angibt:

$$r = [r_0^2 + (r^2 - r_0^2)]^{1/2} = (r_0^2 + \Delta)^{1/2} = r_0(1 + \Delta/r_0^2)^{1/2} \\ = r_0(1 + \Delta/2r_0^2 - \Delta^2/8r_0^4 + \dots) \\ = r_0 + \Delta/2r_0 - \Delta^2/8r_0^3 + \dots = r_0 + d$$

(dabei gilt  $\Delta = (r^2 - r_0^2)$  und  $d = \Delta/2r_0 - \Delta^2/8r_0^3 + \dots$  und  $r_0 = (z_1^2 + t_1^2 - 2z_1t_1\cos\Phi + h^2)^{1/2}$ ).

Dementsprechend ergeben sich für die gegenseitigen Impedanzen  $Z_{13}$  und  $Z_{14}$  die in Fig. 5B dargestellten Ausdrücke. Dabei gilt  $A_1 = \text{sink}d_1 \times \text{sink}d_3$ .

Um diese Gleichungen vereinfacht ausdrücken zu können, wird  $u = z - z_0$ ,  $v = t - t_0$  und  $w = -t + t_2$  gesetzt. Des weiteren wird die Polynomnäherung  $\text{sink}u = ku - (ku^3)/6$  und  $\cos ku = 1 - (ku)^2/2$  durchgeführt und angenommen, daß der Einpol kurz ist, so daß sich für den Realteil  $R_1$  der gegenseitigen Impedanz  $Z_{13}$  die in Fig. 6 dargestellte Gleichung und schließlich das in Fig. 7 gezeigte Ergebnis ergibt. Es ist zu beachten, daß dabei der Anteil  $e^{-jkr_0}$  noch nicht berücksichtigt ist.

Werden die Koeffizienten der Terme von  $k^4$  usw. durch  $P_1$  bis  $P_8$  abgekürzt, ergibt sich folgende Gleichung:

$$R_1 = (\alpha/A_1)[(P_1k^4 - P_2k^6 + P_3k^8 - P_4k^{10})\cos\Phi_1 - P_5k^2 + P_6k^4 - P_7k^6 + P_8k^8]$$

Wird des weiteren näherungsweise " $A_1 = \text{sink}d_1 \times \text{sink}d_3 = d_1d_3k^2$ " gesetzt und der zunächst unterschlagene Anteil  $e^{-jkr_0}$  eingesetzt, so ergibt sich für den Realteil  $R_1$  der gegenseitigen Impedanz  $Z_{13}$  folgender Ausdruck:

$$R_1 = [\alpha e^{-jkr_0}/(d_1d_3k^2)][(P_1k^4 - P_2k^6 + P_3k^8 - P_4k^{10})\cos\Phi_1 - P_5k^2 + P_6k^4 - P_7k^6 + P_8k^8] \\ = [\alpha e^{-jkr_0}/(d_1d_3)][(P_1k^2 - P_2k^4 + P_3k^6 - P_4k^8)\cos\Phi_1 - P_5 + P_6k^2 - P_7k^4 + P_8k^6]$$

Der Imaginärteil  $I_1$  der gegenseitigen Impedanz  $Z_{13}$  wird hingegen durch die in Fig. 8 dargestellte Gleichung sowie das in Fig. 9 gezeigte Endergebnis ausgedrückt, wobei wiederum zunächst der Anteil  $e^{-jkr_0}$  noch nicht berücksichtigt ist.

Werden die Koeffizienten der Terme von  $k^3$  usw. durch  $Q_1$  bis  $Q_8$  abgekürzt, ergibt sich folgende Gleichung:

$$I_1 = (\alpha/A_1)[(Q_1k^3 - Q_2k^5 + Q_3k^7 - Q_4k^9)\cos\Phi_1 - Q_5k + Q_6k^3 - Q_7k^5 + Q_8k^7]$$

Wird des weiteren näherungsweise " $A_1 = \text{sink}d_1 \times \text{sink}d_2 = d_1d_2k^2$ " gesetzt und der zunächst unterschlagene Anteil  $e^{-jkr_0}$  eingesetzt, so ergibt sich für den Imaginärteil  $I_1$  der gegenseitigen Impedanz  $Z_{13}$  folgender Ausdruck:

$$I_1 = [\alpha e^{-jkr_0}/(d_1d_2k^2)][(Q_1k^3 - Q_2k^5 + Q_3k^7 - Q_4k^9)\cos\Phi_1 - Q_5k + Q_6k^3 - Q_7k^5 + Q_8k^7] \\ = [\alpha e^{-jkr_0}/(d_1d_2)][(Q_1k - Q_2k^3 + Q_3k^5 - Q_4k^7)\cos\Phi_1 - Q_5/k + Q_6k - Q_7k^3 + Q_8k^5]$$

Dementsprechend ergibt sich für die gegenseitige Impedanz  $Z_{13}$ :

$$Z_{13} = R_1 + jI_1 \\ = [\alpha e^{-jkr^0}/(d_1 d_3)] [(P_1 k^2 - P_2 k^4 + P_3 k^6 - P_4 k^8) \cos \Phi_1 - P_5 + P_6 k^2 - P_7 k^4 + P_8 k^6] \\ + j[\alpha e^{-jkr^0}/(d_1 d_3)] [(Q_1 k - Q_2 k^3 + Q_3 k^5 - Q_4 k^7) \cos \Phi_1 - Q_5/k + Q_6 k - Q_7 k^3 + Q_8 k^5]. \quad 5$$

Auf ähnliche Weise kann die gegenseitige Impedanz  $Z_{14}$  ermittelt werden, wobei sich hierfür die nachfolgende Gleichung ergibt, falls die Terme von  $k^3$  etc. durch  $R_1$  bis  $R_8$  ausgedrückt sind:

$$Z_{14} = [\alpha e^{-jkr^0}/(d_1 d_4)] [(R_1^2 - R_2 k^4 + R_3 k^6 - R_4 k^8) \cos \Phi_2 + R_5 - R_6 k^2 + R_7 k^4 - R_8 k^6] \\ + j[\alpha e^{-jkr^0}/(d_1 d_4)] [(S_2 k - S_3 k^3 + S_4 k^5 - S_5 k^7) \cos \Phi_1 + S_6/k - S_7 k + S_8 k^3 - S_9 k^5]. \quad 10$$

Somit kann die gegenseitige Impedanz ( $Z_{13} + Z_{14}$ ) als Polynom der Wellenzahl wie folgt dargestellt werden, wobei die Koeffizienten der Terme von  $k^3$  etc. durch  $C_1$  bis  $C_9$  ersetzt worden sind:

$$Z_{13} + Z_{14} = e^{-jkr^0} [(C_0 + C_1 k^2 + C_2 k^4 + C_3 k^6 + C_4 k^8 + \dots) + j(C_5 k^{-1} + C_6 k + C_7 k^3 + C_8 k^5 + C_9 k^7 + \dots)]. \quad 15$$

Wird mit  $Z_{23}$  die gegenseitige Impedanz zwischen den Einpolen  $\langle 2 \rangle$  und  $\langle 3 \rangle$  und mit  $Z_{24}$  die gegenseitige Impedanz zwischen den Einpolen  $\langle 2 \rangle$  und  $\langle 4 \rangle$  beschrieben, kann auf ähnliche Weise die gegenseitige Impedanz ( $Z_{23} + Z_{24}$ ) ermittelt werden, so daß insgesamt die gegenseitige Impedanz ( $Z_{13} + Z_{14} + Z_{23} + Z_{24}$ ) als Polynom der Wellenzahl  $k$  durch eine zu der obigen Formel ähnliche Gleichung dargestellt werden kann. 20

Die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  kann demnach allgemein wie folgt dargestellt werden:

$$Z_{ij} = e^{-jkr^0} [(a_0 + a_1 k^2 + a_2 k^4 + a_3 k^6 + a_4 k^8 + \dots) + j(b_0 k^{-1} + b_1 k + b_2 k^3 + b_3 k^5 + b_4 k^7 + \dots)]. \quad 25$$

Es kann bewiesen werden, daß auch die gegenseitige Impedanz  $Y_{ij}$  analog zu der gegenseitigen Admittanz allgemein durch ein Polynom der Frequenz dargestellt werden kann. Die Näherungsgleichung für die gegenseitige Admittanz  $Y_{ij}$  entspricht genau derjenigen für die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$ . Aus diesem Grunde wird auf den Nachweis der entsprechenden Näherungsgleichung verzichtet.

Die gegenseitige Impedanz  $Y_{ij}$  kann demnach ebenso allgemein wie folgt dargestellt werden: 30

$$Y_{ij} = e^{-jkr^0} [(a_0 + a_1 k^2 + a_2 k^4 + a_3 k^6 + a_4 k^8 + \dots) + j(b_0 k^{-1} + b_1 k + b_2 k^3 + b_3 k^5 + b_4 k^7 + \dots)].$$

Nachfolgend wird die Darstellung der Wechselwirkung  $B_{ij}$  durch eine Polynomfunktion der Frequenz erläutert. 35

Zu diesem Zweck wird der in Fig. 10 dargestellte Einpol betrachtet. In dieser Figur ist der Einpol durch eine dicke durchgezogene Linie dargestellt, während die strichpunktierte Linie analog zu Fig. 3 die Form der Ausdehnungsfunktion angibt.

Es wird das aufgrund der Stromquelle hervorgerufene Magnetfeld untersucht, wobei die Einheitsvektoren wie in Fig. 11A gezeigt definiert ist. 40

Gemäß der stückweisen sinusförmigen Momentenmethode können die Ausdehnungsfunktionen der in Fig. 10 gezeigten Einpole  $\langle 1 \rangle$  bis  $\langle 4 \rangle$  folgendermaßen beschrieben werden, wobei  $d_1, d_2, d_3$  bzw.  $d_4$  die Länge des Einpols  $\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \langle 3 \rangle$  bzw.  $\langle 4 \rangle$  bezeichnet: 45

$$\begin{aligned} \text{Elektrischer Stromeinpol } \langle 1 \rangle: J_1 &= \text{sink}(z - z_0)/\text{sink}d_1, \\ \text{Elektrischer Stromeinpol } \langle 2 \rangle: J_2 &= \text{sink}(z_2 - z)/\text{sink}d_2, \\ \text{Magnetischer Stromeinpol } \langle 3 \rangle: M_3 &= \text{sink}(t - t_0)/\text{sink}d_3, \\ \text{Magnetischer Stromeinpol } \langle 4 \rangle: M_4 &= \text{sink}(t_2 - t)/\text{sink}d_4. \end{aligned}$$

Dabei ist die Stromquelle ausschließlich auf der  $z$ -Achse angeordnet, das elektromagnetische Feld ist (unabhängig von der  $\Phi$ -Koordinate) kreissymmetrisch ausgestaltet und es tritt nur ein  $H_\Phi$ -Anteil auf. Dieser  $H_\Phi$ -Anteil ist durch die in Fig. 11B gezeigte Gleichung definiert. 50

Bei der in Fig. 10 gezeigten Anordnung beträgt die tangentielle Komponente des Magnetfeldes des Einpols  $\langle 3 \rangle$   $H_t = -(h/p) \times H_0 \sin \Phi$ , so daß die Wechselwirkung  $B_{ij}$  durch die in Fig. 11C dargestellte Gleichung beschrieben werden kann. 55

Werden die in Fig. 12 dargestellten Bedingungen in diese Gleichung eingesetzt, ergibt sich die in Fig. 13A dargestellte Gleichung für die Wechselwirkung  $B_{ij}$ .

Des weiteren kann, wie bereits zuvor beschrieben worden ist, die Entfernung  $r$  zwischen den Einpolen ausgedrückt werden durch: 60

$$r = (z^2 + t^2 - 2zt \cos \Phi + h^2)^{1/2} = r_0 + d.$$

Für die Wechselwirkung  $B_{ij}$  ergibt sich demnach die in Fig. 13B gezeigte Gleichung.

Ausgehend von dieser Gleichung kann die Wechselwirkung  $B_{13}$  zwischen den Einpolen  $\langle 1 \rangle$  und  $\langle 3 \rangle$  sowie die Wechselwirkung  $B_{14}$  zwischen den Einpolen  $\langle 1 \rangle$  und  $\langle 4 \rangle$  gemäß Fig. 14 beschrieben werden. 65

Um diese Gleichungen vereinfacht ausdrücken zu können, wird  $u = z - z_0$ ,  $v = t - t_0$  und  $w = -t + t_2$  gesetzt. Des weiteren wird die Polynomnäherung  $\text{sink} u = ku - (ku^3)/6$  und  $\cos ku = 1 - (ku)^2/2$  durchgeführt und angenommen, daß der Einpol kurz ist, so daß sich für den zweiten Term auf der rechten Seite der

Wechselwirkungsgleichung der in Fig. 15 gezeigte Ausdruck und schließlich das in Fig. 16 gezeigte Ergebnis ergibt.

Werden die Koeffizienten der Terme von  $k^2$  usw. durch  $P_1$  bis  $P_8$  abgekürzt, kann die in Fig. 16 gezeigte Gleichung folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$P_1 k^2 + P_2 k^4 + P_3 k^6 + P_4 k^8 + j(P_5 k^3 + P_6 k^5 + P_7 k^7 + P_8 k^9).$$

Auf ähnliche Weise kann auch der erste Term auf der rechten Seite der die Wechselwirkung  $B_{13}$  beschreibenden Gleichung in die in Fig. 17 gezeigte Gleichung und schließlich in den in Fig. 18 gezeigten Ausdruck umgewandelt werden.

Werden die Koeffizienten der Terme von  $k^2$  usw. durch  $Q_1$  bis  $Q_8$  abgekürzt, kann die in Fig. 18 gezeigte Gleichung folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$Q_1 k^4 + Q_2 k^6 + Q_3 k^8 + Q_4 k^{10} + j(Q_5 k^3 + Q_6 k^5 + Q_7 k^7 + Q_8 k^9).$$

Mit diesen Abkürzungen kann die Wechselwirkung  $B_{13}$  schließlich folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$B_{13} = [h_1 \sin \Phi_1 / (4\pi \sin k d_1 \times \sin k d_3)] e^{-jkr^0} \times [P_1 k^2 + P_2 k^4 + P_3 k^6 + P_4 k^8 + j(P_5 k^3 + P_6 k^5 + P_7 k^7 + P_8 k^9) + Q_1 k^4 + Q_2 k^6 + Q_3 k^8 + Q_4 k^{10} + j(Q_5 k^3 + Q_6 k^5 + Q_7 k^7 + Q_8 k^9)].$$

Wird des weiteren näherungsweise  $\sin k d_1 \times \sin k d_3 = d_1 d_3 k^2$  eingesetzt, so ergibt sich für die Wechselwirkung  $B_{13}$  folgende Gleichung:

$$B_{13} = [h_1 \sin \Phi_1 / (4\pi d_1 d_3)] e^{-jkr^0} \times [P_1 + (P_2 + Q_1)k^2 + (P_3 + Q_2)k^4 + (P_4 + Q_3)k^6 + Q_4 k^8 + j(P_5 + Q_5)k^3 + (P_6 + Q_6)k^5 + (P_7 + Q_7)k^7 + (P_8 + Q_8)k^9] = e^{-jkr^0} [R_1 + R_2 k^2 + R_3 k^4 + R_4 k^6 + R_5 k^8 + j(R_6 k^3 + R_7 k^5 + R_8 k^7 + R_9 k^9)].$$

Auf ähnliche Weise kann die Wechselwirkung  $B_{14}$  ermittelt werden, wobei sich hierfür die nachfolgende Gleichung ergibt:

$$B_{14} = e^{-jkr^0} [S_1 + S_2 k^2 + S_3 k^4 + S_4 k^6 + S_5 k^8 + j(S_6 k^3 + S_7 k^5 + S_8 k^7 + S_9 k^9)].$$

Somit kann die Wechselwirkung ( $B_{13} + B_{14}$ ) als Polynom der Wellenzahl wie folgt dargestellt werden:

$$B_{13} + B_{14} = e^{-jkr^0} [C_1 + C_2 k^2 + C_3 k^4 + C_4 k^6 + C_5 k^8 + j(C_6 k^3 + C_7 k^5 + C_8 k^7 + C_9 k^9)].$$

Wird mit  $B_{23}$  die Wechselwirkung zwischen den Einpolen  $\langle 2 \rangle$  und  $\langle 3 \rangle$  und mit  $B_{24}$  die Wechselwirkung zwischen den Einpolen  $\langle 2 \rangle$  und  $\langle 4 \rangle$  beschrieben, kann auf ähnliche Weise die Wechselwirkung ( $B_{23} + B_{24}$ ) ermittelt werden, so daß insgesamt die Wechselwirkung ( $B_{13} + B_{14} + B_{23} + B_{24}$ ) als Polynom der Wellenzahl  $k$  durch eine zu der obigen Formel ähnliche Gleichung dargestellt werden kann.

Die Wechselwirkung  $B_{ij}$  kann demnach allgemein wie folgt dargestellt werden:

$$B_{ij} = e^{-jkr^0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f^1 + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)].$$

Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung detailliert anhand der von der erfindungsgemäßen Simulationsvorrichtung 1 durchgeführten Verfahrensschritte erläutert. Es wird darauf hingewiesen, daß der Einfachheit halber die Simulation bei dem nachfolgend beschriebenen Ausführungsbeispiel ohne Berücksichtigung der gegenseitigen Admittanz und der Wechselwirkung durchgeführt wird.

Fig. 19 zeigt ein Ausführungsbeispiel der von der erfindungsgemäßen Simulationsvorrichtung 1 durchgeführten Verfahrensschritte. Dabei ist mit 100 eine Verwaltungsdatei bezeichnet, welche die Konfigurationsinformationen der zu simulierenden und in Elemente unterteilten elektronischen Vorrichtung verwaltet.

Wie aus diesem Flußdiagramm ersichtlich ist, wird in Schritt 1 (ST1) zunächst eine "Eingabe einer Wellenquelle", in Schritt 2 (ST2) eine "Berechnung einer Näherungsgleichung", in Schritt 3 (ST3) eine "Berechnung eines Oberwellenstromes", in Schritt 4 (ST4) eine "Berechnung eines Stromes", in Schritt 5 (ST5) eine "Berechnung einer Spannung", in Schritt 6 (ST6) eine "Berechnung eines elektromagnetischen Feldes", in Schritt 7 (ST7) eine "Berechnung einer zwischen zwei Leitern auftretenden Spannung" und in Schritt 8 (ST8) eine "Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung" durchgeführt.

Fig. 20 zeigt ein Ausführungsbeispiel der "Eingabe einer Wellenquelle" gemäß des in Fig. 19 gezeigten Schrittes ST1.

Wie in diesem Flußdiagramm dargestellt ist, werden während des Schrittes "Eingabe einer Wellenquelle" im Zeitbereich vorliegende Wellenquellendaten aus der Verwaltungsdatei 100 ausgelesen.

Wie in Fig. 21 gezeigt ist, werden ausgelesene Daten unterteilt und fouriertransformiert, um auf diese Weise das Frequenzspektrum der Wellenquelle zu erhalten. Wird zu diesem Zeitpunkt der Gleichanteil dieses Frequenzspektrums benötigt, kann nach dem Ohm'schen Gesetz dieser Gleichanteil erhalten werden.

Zum Testen einer elektronischen Vorrichtung kann ein Hochspannungsimpuls oder ein hoher Stromimpuls angelegt und dessen Auswirkungen untersucht werden. Zur Simulation dieses Vorganges muß als Wellenquelle ein mit einer Anfangsspannung geladener Kondensator oder eine mit einem Anfangsstrom versorgte Spule angenommen werden.

Für den Fall, daß die Wellenquelle durch einen mit einer Anfangsspannung geladenen Kondensator gebildet wird, kann diese Wellenquelle in die in Fig. 22A gezeigte Ersatzschaltung umgewandelt werden. Da für die Anwendung der Fouriertransformation Periodizität erforderlich ist, wird, wie in Fig. 22B gezeigt ist, eine von dieser Ersatzschaltung erzeugte stufenförmig verlaufende Spannung der Einfachheit halber als Spannungsimpulse mit langen Perioden  $t_1$  und  $t_2$  behandelt. Durch die Anfangsspannung des Kondensators wird im allgemeinen eine gedämpfte Schwingung hervorgerufen, wobei die Zeit bis zum Ausschwingen dieser gedämpften Oszillation vorhersagbar ist, so daß den Zeitspannen  $t_1$  und  $t_2$  ein Wert zugewiesen wird, der größer als diese zum Ausschwingen des Kondensators benötigte Zeitspanne ist.

Für den Fall, daß die Wellenquelle durch eine mit einem Anfangsstromtor versorgte Spule gebildet wird, kann diese Wellenquelle in die in Fig. 23A gezeigte Ersatzschaltung umgewandelt werden. Da wiederum für die Anwendung der Fouriertransformation Periodizität erforderlich ist, wird, wie in Fig. 23B gezeigt ist, ein von dieser Ersatzschaltung erzeugter stufenförmig verlaufender Strom der Einfachheit halber als Stromimpulse mit langen Perioden  $t_1$  und  $t_2$  behandelt. Durch den Anfangsstrom der Spule wird im allgemeinen eine gedämpfte Schwingung hervorgerufen, wobei die Zeit bis zum Ausschwingen dieser gedämpften Oszillation vorhersagbar ist, so daß den Zeitspannen  $t_1$  und  $t_2$  ein Wert zugewiesen wird, der größer als diese zum Ausschwingen der Spule benötigte Zeitspanne ist.

Auf diese Weise werden während des Schrittes "Eingabe einer Wellenquelle" die im Zeitbereich vorliegenden Wellenquellendaten aus der Verwaltungsdatei 100 ausgelesen, unterteilt und fouriertransformiert, um somit das Frequenzspektrum der entsprechenden Wellenquelle zu erhalten. Anschließend wird, wie bereits erwähnt worden ist, mit dem Schritt "Berechnung einer Näherungsgleichung" (ST2 in Fig. 19) fortgefahren.

Fig. 24 zeigt ein Ausführungsbeispiel für den Ablauf des in Fig. 19 gezeigten Schrittes "Berechnung einer Näherungsgleichung".

Wie in diesem Flußdiagramm dargestellt ist, wird während der "Berechnung einer Näherungsgleichung" zunächst in Schritt 1 (ST1) ein Frequenzbereich aus den positiven Seitenfrequenzen des infolge des Schrittes "Eingabe einer Wellenquelle" erhaltenen Frequenzspektrums der Wellenquelle ausgewählt bzw. spezifiziert. Ist eine sehr hohe Genauigkeit erforderlich, wird der gesamte Frequenzbereich ausgewählt. Soll hingegen primär die Simulationszeit verkürzt werden, können die Oberwellenanteile der Frequenz entfernt und nur die innerhalb eines schmalen Frequenzbandes liegenden Frequenzen ausgewählt bzw. für die Simulation verwendet werden.

Nachfolgend werden in Schritt 2 (ST2) Abtastfrequenzen aus dem in Schritt 1 festgelegten Frequenzbereich ausgewählt. So können beispielsweise fünf Abtastfrequenzen  $f_{s1}$ ,  $f_{s2}$ ,  $f_{s3}$ ,  $f_{s4}$  bzw.  $f_{s5}$  ausgewählt werden. Die Abtastfrequenzen werden aus dem in dem Schritt 1 (ST1) festgelegten Frequenzbereich derart ausgewählt, daß durch sie dieser Frequenzbereich grob unterteilt wird. Für eine hohe Genauigkeit muß die Anzahl der Abtastfrequenzen erhöht werden. Hingegen ist die Anzahl der Abtastfrequenzen zu reduzieren, falls primär eine Verkürzung der Simulationszeit angestrebt ist.

Nach Auswahl einer Abtastfrequenz aus den bisher noch nicht verarbeiteten Abtastfrequenzen in Schritt 3 (ST3) wird für die ausgewählte Abtastfrequenz in Schritt 4 (ST4) die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  ( $i, j = 1 \dots M$ ) mit Hilfe eines genauen Berechnungsverfahrens berechnet, und der berechnete Wert wird in einer Arbeitsdatei 200 gespeichert. Anschließend wird wieder zu dem Anfang des Schrittes 3 (ST3) zurückgekehrt.

Nachdem jede festgelegte Abtastfrequenz verarbeitet worden ist, wird in Schritt 3 (ST3) erkannt, daß die Berechnung der gegenseitigen Impedanz  $Z_{ij}$  ( $i, j = 1 \dots M$ ) für alle Abtastfrequenzen abgeschlossen ist, und es wird mit Schritt 5 (ST5) fortgefahren, in dem die folgende Näherungsgleichung für die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  bestimmt wird:

$$Z_{ij} = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f^1 + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)]$$

(wobei  $f$  die Frequenz,  $k$  die Wellenzahl bzw.  $r_0$  den Abstand zwischen zwei Elementen  $i$  und  $j$  beschreibt). Die in der Arbeitsdatei gespeicherten Abtastfrequenzen und die entsprechenden Werte der gegenseitigen Impedanz  $Z_{ij}$  werden in diese Gleichung eingesetzt, um auf diese Weise Simulationsgleichungen mit den Koeffizienten  $a_0$  bis  $a_4$  und  $b_0$  bis  $b_4$  als Unbekannte zu erhalten. Diese Simulationsgleichungen werden gelöst, um die Koeffizienten  $a_0$  bis  $a_4$  und  $b_0$  bis  $b_4$  zu ermitteln. Diese Koeffizienten werden anschließend in der Arbeitsdatei 200 gespeichert.

Wurden beispielsweise die gegenseitigen Impedanzen  $Z_{ij1}$  bis  $Z_{ij5}$  zwischen den Elementen  $i$  und  $j$  für fünf Abtastfrequenzen  $fs1$  bis  $fs5$  folgendermaßen ermittelt:

$$\begin{aligned} Z_{ij1} &= \alpha_{ij1} + j\beta_{ij1}, \\ Z_{ij2} &= \alpha_{ij2} + j\beta_{ij2}, \\ Z_{ij3} &= \alpha_{ij3} + j\beta_{ij3}, \\ Z_{ij4} &= \alpha_{ij4} + j\beta_{ij4}, \\ Z_{ij5} &= \alpha_{ij5} + j\beta_{ij5}. \end{aligned}$$

so ergeben sich die folgenden Simulationsgleichungen:

$$\begin{aligned} \alpha_{ij1} &= \exp(-j(2\pi f_{s1}/c)r_0) [a_0 + a_1 f_{s1}^2 + a_2 f_{s1}^4 + a_3 f_{s1}^6 + a_4 f_{s1}^8], \\ \alpha_{ij2} &= \exp(-j(2\pi f_{s2}/c)r_0) [a_0 + a_1 f_{s2}^2 + a_2 f_{s2}^4 + a_3 f_{s2}^6 + a_4 f_{s2}^8], \\ \alpha_{ij3} &= \exp(-j(2\pi f_{s3}/c)r_0) [a_0 + a_1 f_{s3}^2 + a_2 f_{s3}^4 + a_3 f_{s3}^6 + a_4 f_{s3}^8], \\ \alpha_{ij4} &= \exp(-j(2\pi f_{s4}/c)r_0) [a_0 + a_1 f_{s4}^2 + a_2 f_{s4}^4 + a_3 f_{s4}^6 + a_4 f_{s4}^8], \\ \alpha_{ij5} &= \exp(-j(2\pi f_{s5}/c)r_0) [a_0 + a_1 f_{s5}^2 + a_2 f_{s5}^4 + a_3 f_{s5}^6 + a_4 f_{s5}^8], \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \beta_{ij1} &= \exp[-j(2\pi f_{s1}/c)r_0][b_0 + b_1 f_{s1}^2 + b_2 f_{s1}^4 + b_3 f_{s1}^6 + b_4 f_{s1}^8] \\ \beta_{ij2} &= \exp[-j(2\pi f_{s2}/c)r_0][b_0 + b_1 f_{s2}^2 + b_2 f_{s2}^4 + b_3 f_{s2}^6 + b_4 f_{s2}^8] \\ \beta_{ij3} &= \exp[-j(2\pi f_{s3}/c)r_0][b_0 + b_1 f_{s3}^2 + b_2 f_{s3}^4 + b_3 f_{s3}^6 + b_4 f_{s3}^8] \\ \beta_{ij4} &= \exp[-j(2\pi f_{s4}/c)r_0][b_0 + b_1 f_{s4}^2 + b_2 f_{s4}^4 + b_3 f_{s4}^6 + b_4 f_{s4}^8] \\ 5 \quad \beta_{ij5} &= \exp[-j(2\pi f_{s5}/c)r_0][b_0 + b_1 f_{s5}^2 + b_2 f_{s5}^4 + b_3 f_{s5}^6 + b_4 f_{s5}^8] \end{aligned}$$

Durch Lösen dieser Simulationsgleichungen können die Koeffizienten  $a_0$  bis  $a_5$  und  $b_0$  bis  $b_4$  ermittelt werden, so daß sich die folgende Näherungsgleichung für die zwischen einem Element  $i$  und einem Element  $j$  auftretende gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  ergibt:

$$10 \quad Z_{ij} = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8) + j(b_0 f + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9)].$$

Es ist zu beachten, daß diese Näherungsgleichung unabhängig für jede Frequenz ausgewertet werden kann, so daß eine weitere Erhöhung der Verarbeitungsgeschwindigkeit durch die Verwendung eines parallelen Computers erzielbar ist.

Nach der Ermittlung der geeigneten Näherungsgleichung für die zwischen Elementen  $i$  und  $j$  auftretende gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  ( $i, j = 1 \dots M$ ) durch den Schritt "Berechnung einer Näherungsgleichung" wird mit dem Schritt "Berechnung eines Oberwellenstromes" (ST3 in Fig. 19) fortgefahren.

Fig. 25 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Flußdiagrammes für den Schritt "Berechnung eines Oberwellenstromes".

Wie aus diesem Flußdiagramm ersichtlich ist, wird in Schritt 1 (ST1) der "Berechnung eines Oberwellenstromes" zunächst eine noch nicht verarbeitete Frequenz aus den positiven Seitenfrequenzen des in dem Schritt "Eingabe einer Wellenquelle" erhaltenen positiven Seitenfrequenzspektrums ausgewählt.

Nachfolgend wird in Schritt 2 (ST2) die ausgewählte Frequenz in die Näherungsgleichung für die gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  eingesetzt, welche in dem Schritt "Berechnung einer Näherungsgleichung" ermittelt worden ist, um die zwischen einem Element  $i$  und einem Element  $j$  auftretende gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  ( $i, j = 1 \dots M$ ) zu berechnen. Die Berechnung dieser gegenseitigen Impedanz ist ein einfacher Einsetzvorgang, so daß die Berechnung mit einer äußerst hohen Geschwindigkeit durchgeführt werden kann.

Anschließend werden in Schritt 3 (ST3) die in Fig. 26 gezeigten Simulationsgleichungen gemäß der Momentenmethode gelöst, indem die in Schritt 2 (ST2) berechnete gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  ( $i, j = 1 \dots M$ ) und das Frequenzspektrum  $V(\omega)$  ( $\omega = 2\pi f_q$ ) der Wellenquelle für die in Schritt 1 (ST1) ausgewählte Frequenz  $f_q$  ausgewertet werden, um die in jedem Element bei der in Schritt 1 (ST1) ausgewählten Frequenz  $f_q$  fließenden Ströme  $I_1(f_q)$  bis  $I_M(f_q)$  zu ermitteln. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis sämtliche Frequenzen in Schritt 1 (ST1) ausgewählt worden sind. Auf diese Weise werden für sämtliche Frequenzen  $f_q$  ( $q = 1 \dots N$ ) die in jedem Element fließenden Ströme  $I_1(f_q)$  bis  $I_M(f_q)$  ermittelt.

Dabei wird bei den in Fig. 26 gezeigten Simulationsgleichungen der Momentenmethode angenommen, daß die Wellenquelle  $V(\omega)$  in dem Element  $m$  vorhanden ist. Es sei darauf hingewiesen, daß eine weitere Verarbeitungsbeschleunigung erzielt werden kann, wenn bei der Lösung der Simulationsgleichungen der Momentenmethode beispielsweise die (in der Japanischen Patentanmeldung 7-342695 offenbarte) LU-Auflösungsmethode verwendet wird.

Das in dem Schritt "Eingabe einer Wellenquelle" erhaltene Frequenzspektrum weist, wie aus Fig. 21 ersichtlich ist, auch ein negatives Seitenfrequenzband auf. Wie oben beschrieben worden ist, werden durch die Schritte "Berechnung einer Näherungsgleichung" und "Berechnung eines Oberwellenstromes" lediglich die von einer Wellenquelle mit positiven Seitenfrequenzen induzierten Ströme berechnet. Daher müssen auch die von einer Wellenquelle mit negativen Seitenfrequenzen induzierten Ströme ermittelt werden.

Diese Berechnung wird durchgeführt, indem die Tatsache ausgenützt wird, daß zwischen den in jedem Element  $m$  fließenden Strömen  $I_m(\omega)$  und  $I_m(-\omega)$  ein konjugiert-komplexer Zusammenhang besteht, da zwischen  $Z_{ij}(\omega)$  und  $Z_{ij}(-\omega)$  der folgende konjugiert-komplexe Zusammenhang vorhanden ist:

$$50 \quad Z_{ij}(\omega) = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8) + j(b_0 f + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9)]$$

$$Z_{ij}(-\omega) = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8) - j(b_0 f + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9)].$$

Zwischen den Frequenzspektren  $V(\omega)$  und  $V(-\omega)$  der Wellenquelle besteht ebenfalls ein konjugiert-komplexer Zusammenhang. Der durch eine Wellenquelle mit negativen Seitenfrequenzen hervorgerufene Strom  $I_m(-\omega)$  kann demnach durch Umkehren des Vorzeichens des Imaginärteils des von der Wellenquelle mit den positiven Seitenfrequenzen hervorgerufenen Stromes  $I_m(\omega)$  ermittelt werden.

Es ist zu beachten, daß diese "Berechnung eines Oberwellenstromes" unabhängig für jede Frequenz möglich ist, so daß dieses Verfahren durch die Verwendung eines parallelen Computers weiter beschleunigt werden kann.

Nach Berechnen des in jedem Element bei entsprechenden Frequenzen fließenden Stromes mit Hilfe des Schrittes "Berechnung eines Oberwellenstromes" wird das Verfahren mit dem Schritt "Berechnung eines Stromes" (ST4 in Fig. 19) fortgesetzt.

Fig. 27 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Flußdiagramms für diesen Schritt "Berechnung eines Stromes".

Wie in diesem Flußdiagramm dargestellt, werden zunächst im Laufe des Schrittes "Berechnung eines Stromes", nachdem durch einen Benutzer derjenige Punkt (bzw. dasjenige Element) bestimmt worden ist, für den der Strom berechnet werden soll (ST1), die bei entsprechenden Frequenzen durch diesen bestimmten Punkt fließenden Ströme  $I_p(f_1)$  bis  $I_p(f_N)$ ,  $I_p(0)$  und  $I_p(-f_1)$  bis  $I_p(-f_N)$  aufgegriffen bzw. ausgelesen und anschließend die inverse Fourier-Transformation durchgeführt (ST2), um den in dem bestimmten Punkt  $p$  fließenden Strom im



Zeitbereich zu berechnen.

Nachdem mit Hilfe dieses Verfahrensschrittes "Berechnung eines Stromes" ein in einem bestimmten Punkt fließender Strom im Zeitbereich berechnet worden ist, wird mit dem Schritt "Berechnung einer Spannung (vgl. ST5 in Fig. 19) fortgefahren.

Fig. 28 zeigt ein Beispiel für die Durchführung der "Berechnung einer Spannung".

Wie in diesem Flußdiagramm dargestellt ist, werden im Laufe des Schrittes "Berechnung einer Spannung", nachdem durch einen Benutzer derjenige Punkt (bzw. dasjenige Element) bestimmt worden ist, für den die Spannung berechnet werden soll (ST1), zunächst die bei entsprechenden Frequenzen durch diesen bestimmten Punkt fließenden Ströme  $I_p(f_1)$  bis  $I_p(f_N)$ ,  $I_p(0)$  und  $I_p(-f_1)$  bis  $I_p(-f_N)$  aufgegriffen bzw. ausgelesen (ST2) und anschließend diese Werte mit den Impedanzen  $Z_p(f_1)$  bis  $Z_p(f_N)$ ,  $Z_p(0)$  und  $Z_p(-f_1)$  bis  $Z_p(-f_N)$  des bestimmten Punktes p für die einzelnen Frequenzen multipliziert, um die in dem bestimmten Punkt p bei den einzelnen Frequenzen auftretende Spannung  $V_p(f_1)$  bis  $V_p(f_N)$ ,  $V_p(0)$  und  $V_p(-f_1)$  bis  $V_p(-f_N)$  zu erhalten (ST3).

Nachfolgend werden diese somit für die einzelnen Frequenzen ermittelten Spannungen  $V_p(f_1)$  bis  $V_p(f_N)$ ,  $V_p(0)$  und  $V_p(-f_1)$  bis  $V_p(-f_N)$  einer inversen Fourier-Transformation (ST4) unterzogen, um die in dem bestimmten Punkt p auftretende Spannung im Zeitbereich zu berechnen.

Nachdem mit Hilfe des Schrittes "Berechnung einer Spannung" die in einem bestimmten Punkt auftretende Spannung im Zeitbereich ermittelt worden ist, wird das Verfahren mit dem Schritt "Berechnung eines elektromagnetischen Feldes" fortgesetzt (vgl. ST6 in Fig. 19).

Fig. 29 zeigt ein Ausführungsbeispiel für ein Flußdiagramm für den Verfahrensschritt Berechnung eines elektromagnetischen Feldes".

Dabei wird zur Erläuterung der Fall betrachtet, daß die Intensität eines elektrischen Feldes berechnet werden soll. Wie in diesem Flußdiagramm dargestellt ist, wird zunächst in dem Verfahrensschritt "Berechnung eines elektromagnetischen Feldes" durch einen Benutzer ein Untersuchungspunkt p festgelegt (ST1). Anschließend wird aufgrund bekannter theoretischer Formeln für elektromagnetische Felder das an dem Untersuchungspunkt p auftretende und durch die in jedem Element bei den einzelnen Frequenzen fließenden Ströme hervorgerufene elektrische Feld ermittelt, um auf diese Weise die in dem Untersuchungspunkt p bei den bestimmten Frequenzen erzeugten elektrische Felder  $E_p(f_1)$  bis  $E_p(f_N)$ ,  $E_p(0)$  und  $E_p(-f_1)$  bis  $E_p(-f_N)$  zu ermitteln.

Nachfolgend wird auf die für die einzelnen Frequenzen ermittelten elektrischen Felder  $E_p(f_1)$  bis  $E_p(f_N)$ ,  $E_p(0)$  und  $E_p(-f_1)$  bis  $E_p(-f_N)$  die inverse Fourier-Transformation angewendet, um auf diese Weise das in dem Überwachungspunkt p erzeugte elektrische Feld im Zeitbereich zu berechnen (ST4). Auf ähnliche Weise wird auch das magnetische Feld berechnet.

Nach Ermittlung des elektromagnetischen Feldes mit Hilfe des Verfahrensschrittes "Berechnung eines elektromagnetischen Feldes", wird mit dem Verfahrensschritt "Berechnung einer zwischen Leitern anliegenden Spannung" (ST7 in Fig. 19) fortgefahren.

Bei diesem Verfahrensschritt "Berechnung einer zwischen Leitern anliegenden Spannung" kann nach Festlegung einer zu verarbeitenden Stelle p zwischen Leitern durch einen Benutzer die zwischen den Leitern bei einer bestimmten Kreisfrequenz  $\omega$  auftretende Spannung  $V_p(\omega)$  durch folgende Formel ausgedrückt werden, wobei der bei einer bestimmten Kreisfrequenz  $\omega$  in einem Element n fließende Strom mit  $I_n(\omega)$  und die zwischen der Stelle p der Leiter und dem Element n auftretende gegenseitige Impedanz mit  $Z_{pn}(\omega)$  bezeichnet ist:

$$\text{Formel 1: } V_p(\omega) = - \sum_{n=1}^M I_n(\omega) Z_{pn}(\omega).$$

Auf diese Weise kann die bei bestimmten Frequenzen zwischen den Leitern anliegende Spannung  $V_p(f_1)$  bis  $V_p(f_N)$ ,  $V_p(0)$  und  $V_p(-f_1)$  bis  $V_p(-f_N)$  ermittelt werden.

Anschließend wird auf diese bei den bestimmten Frequenzen zwischen den Leitern anliegenden Spannungen  $V_p(f_1)$  bis  $V_p(f_N)$ ,  $V_p(0)$  und  $V_p(-f_1)$  bis  $V_p(-f_N)$  die inverse Fourier-Transformation angewendet, um somit die zwischen den Leitern an der Stelle p auftretende Spannung im Zeitbereich zu erhalten.

Zur Erläuterung der obigen Formel 1 wird Fig. 30 betrachtet. Ist zwischen die mit p1 und p2 bezeichneten Leiter ein Widerstand R eingefügt, ergibt sich die in Fig. 31A dargestellte Gleichung aufgrund der Randbedingung, daß das elektrische Feld um jeden Leiter Null ist. Daraus kann die in Fig. 31B gezeigte Gleichung für den zwischen den Leitern fließenden Strom  $I_p$  abgeleitet werden, so daß sich wiederum für die zwischen den Leitern anliegende Spannung  $V_p$  die in Fig. 31C gezeigte Formel ergibt. Tatsächlich fließt jedoch zwischen den Leitern kein Strom, so daß in die in Fig. 31C dargestellte Formel die Werte " $R \rightarrow \infty$  und  $I_{p1}, I_{p2} \rightarrow \infty$ " eingesetzt werden können. Dadurch ergibt sich die oben angegebene Formel 1.

Die Formel 1 wird somit aus dem von einem imaginär zwischen die Leiter eingefügten Widerstand erzeugten Spannungsspektrum abgeleitet, wobei der Widerstand unendlich groß gewählt wird.

Nachdem auf diese Weise die zwischen Leitern anliegende Spannung mit Hilfe des Verfahrensschrittes "Berechnung einer zwischen Leitern anliegenden Spannung" ermittelt worden ist, wird mit dem Verfahrensschritt "Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung" (ST8 in Fig. 19) fortgefahren.

Der Schritt "Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung" dient zur Simulation des einer Empfangsschaltung zugeführten Stromes bzw. einer entsprechenden Spannung, die durch ein externes elektrisches Feld in einer über einer weiten Bodenebene angeordneten Übertragungsleitung hervorgerufenen werden.

Dabei sei die Übertragungsleitung wie in Fig. 32 dargestellt über der weiten Bodenebene angeordnet. Wird mit  $Z_d$  die Impedanz am sendeseitigen Ende, mit  $L$  die Länge der Übertragungsleitung, mit  $h$  die Höhe der Übertragungsleitung, mit  $\beta$  das Übertragungsmaß bzw. der Fortpflanzungskoeffizient der Übertragungsleitung,

mit  $Z_0$  der Wellenwiderstand der Übertragungsleitung, mit  $E_x^i(x, z)$  der x-Anteil in der Stelle  $(x, y)$  der Übertragungsleitung aufgrund des in einem anderen Leiter fließenden Stromes wirkenden elektrischen Feldes und mit  $E_z^i(x, z)$  der z-Anteil des in der Stelle  $(x, y)$  der Übertragungsleitung aufgrund des in einem anderen Leiter fließenden Stromes wirkenden elektrischen Feldes bezeichnet, ergibt sich für  $K(x)$  folgender Ausdruck:

Formel 2:  $K(x) = E_x^i(x, h) - E_x^i(x, 0)$ .

Für D gilt:

Formel 3:  $D = (Z_0 Z_d + Z_0 Z_r) \cos \beta L + j(Z_0^2 + Z_d Z_r) \sin \beta L$ .

$E_z^i$  und  $K(x)$  können aufgrund der auf anderen Leitern auftretenden Stromverteilung sowie der mit Hilfe der Momentenmethode berechneten gegenseitigen Impedanz durch die in Fig. 34 gezeigte Formel berechnet werden, wenn die Übertragungsleitung wie in Fig. 33 gezeigt durch die sinusförmige Ausdehnungsfunktion  $J_1$  usw. ähnlich zu der Momentenmethode unterteilt bzw. beschrieben wird. Dabei bezeichnet  $Z_{om}$  die zwischen der oberen Leitung der Übertragungsleitung und einem anderen Leiter auftretende gegenseitige Impedanz und  $Z_{om}'$  die zwischen der unteren Leitung der Übertragungsleitung und dem anderen Leiter auftretende gegenseitige Impedanz.

Es ist auch bekannt, daß bei der Existenz eines derartigen externen elektrischen Feldes  $E_x^i$  und  $E_z^i$  der an dem sendeseitigen Ende der Übertragungsleitung auftretende Strom  $I_d(\omega)$  durch die in Fig. 35 dargestellte Formel von "C. D. Taylor" ermittelt werden kann. Der Term A dieser Gleichung ist in Fig. 36A aufgelöst dargestellt, so daß sich für den am sendeseitigen Ende der Übertragungsleitung auftretenden Strom  $I_d(\omega)$  der in Fig. 36B gezeigte Ausdruck ergibt.

Des weiteren ist bekannt, daß bei der Existenz eines externen elektrischen Feldes der am empfangsseitigen Ende der Übertragungsleitung auftretende Strom  $I_r(\omega)$  durch die in Fig. 37 gezeigte Gleichung von "C. D. Taylor" beschrieben werden kann, wobei sich für diesen Strom schließlich der in Fig. 38 dargestellte Ausdruck ergibt.

Es wird darauf hingewiesen, daß diese Formeln von "C. D. Taylor" in "The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field", C. D. Taylor, R. S. Satterwhite und C. W. Harrison, Jr., IEEE Trans. Antennas Propagation, Ap-13, No. 6, Seiten 987—989, Nov. 1967 offenbart sind.

Somit kann der am sendeseitigen Ende der Übertragungsleitung auftretende Strom  $I_d(\omega)$  und der am empfangsseitigen Ende der Übertragungsleitung auftretende Strom  $I_r(\omega)$  anhand der von "C. D. Taylor" ermittelten Formeln bestimmt werden, wenn das externe elektrische Feld  $E_x^i$  und  $E_z^i$  (bzw.  $E_z^i$  und  $K(x)$ ) hinsichtlich der Übertragungsleitung bekannt ist, und die ermittelten Stromwerte werden mit der Impedanz multipliziert, um auf diese Weise die am sendeseitigen Ende der Übertragungsleitung anliegende Spannung  $V_d(\omega)$  und die am empfangsseitigen Ende der Übertragungsleitung anliegende Spannung  $V_r(\omega)$  zu ermitteln.

Aufgrund der von "C. D. Taylor" entwickelten Gleichungen können daher die am sendeseitigen bzw. empfangsseitigen Ende der Übertragungsleitung bei bestimmten Frequenzen auftretenden Ströme " $I_p(f_1)$  bis  $I_p(f_N)$ ,  $I_p(0)$  und  $I_p(-f_1)$  bis  $I_p(-f_N)$ " durch den Verfahrensschritt "Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung" ermittelt und anschließend der inversen Fourier-Transformation unterzogen werden, um die am sendeseitigen Ende bzw. empfangsseitigen Ende der Übertragungsleitung auftretenden Ströme im Zeitbereich zu berechnen. Des weiteren werden die am sendeseitigen bzw. empfangsseitigen Ende der Übertragungsleitung bei bestimmten Frequenzen anliegenden Spannungen " $V_p(f_1)$  bis  $V_p(f_N)$ ,  $V_p(0)$  und  $V_p(-f_1)$  bis  $V_p(-f_N)$ " mit Hilfe der Gleichungen von "C. D. Taylor" ermittelt und der inversen Fourier-Transformation unterzogen, um die am sendeseitigen bzw. empfangsseitigen Ende der Übertragungsleitung anliegenden Spannungen im Zeitbereich zu ermitteln.

Durch den Verfahrensschritt "Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung" kann daher der einer Empfangsschaltung zugeführte Strom bzw. eine entsprechenden Spannung, die durch ein externes elektrisches Feld in einer Übertragungsleitung hervorgerufen werden, simuliert werden.

Fig. 39A und 39B zeigen das Ergebnis der Simulation infolge des Schrittes "Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung". Diese Simulation wurde unter den in Fig. 40 gezeigten Bedingungen durchgeführt.

Fig. 39A zeigt den Sendestrom einer angenommenen Sendeantenne, während Fig. 39B den infolge des Sendestroms über die Übertragungsleitung fließenden Strom darstellt. Bei dieser Simulation wurde simuliert, daß der in einer von der Sendeantenne 1m entfernt angeordneten Übertragungsleitung fließende Strom mit demselben Wellentyp bzw. (Mode) und mit einer der Übertragungszeit der Radiowellen entsprechenden Zeitverzögerung fließt, so daß die Gültigkeit des Verfahrensschrittes "Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung" überprüft werden konnte.

Wird eine sich zeitlich ändernde Wellenquelle vorgegeben, transformiert die erfindungsgemäße Simulationsvorrichtung 1 diese Wellenquelle in den Frequenzbereich, ermittelt äußerst schnell die gegenseitige Impedanz durch Verwendung der Näherungsgleichung, simuliert im Frequenzbereich die Intensität des elektromagnetischen Feldes usw. mit Hilfe der Momentenmethode und führt hinsichtlich des Ergebnisses eine inverse Fourier-Transformation in den Zeitbereich durch.

Bei diesem Ausführungsbeispiel werden die in Fig. 26 gezeigten Simulationsgleichungen der Momentenmethode lediglich durch Berücksichtigung der gegenseitigen Impedanz gelöst; werden hingegen die in Fig. 41 gezeigten Simulationsgleichungen verwendet, die zudem die gegenseitige Admittanz und die Wechselwirkung berücksichtigen, können die gegenseitige Admittanz und die Wechselwirkung ebenfalls durch die zuvor erwähnten Näherungsgleichungen äußerst schnell ermittelt werden.

Bei der in Fig. 41 dargestellten Gleichung bezeichnet  $I_{ca}$  einen in einem Metallobjekt fließenden elektrischen



Strom,  $I_{d2}$  einen entlang der Oberfläche eines dielektrischen Objekts fließenden elektrischen Strom und  $M_2$  einen entlang der Oberfläche des dielektrischen Objekts fließenden magnetischen Strom. Der hochgestellte Index "0" bezieht sich auf einen Wert in der Luft, der hochgestellte Index "d" bezieht sich auf einen Wert in dem dielektrischen Objekt, die Erweiterung "c" bezieht sich auf ein Metallobjekt und die Erweiterung "d" bezieht sich auf ein dielektrisches Objekt.

Auch bei diesem Ausführungsbeispiel wird nach der Lösung dieser Gleichungen der Momentenmethode das Spannungsspektrum usw. durch die Verfahrensschritte "Berechnung einer Spannung", "Berechnung eines elektromagnetischen Feldes", "Berechnung einer zwischen Leitern anliegenden Spannung" und "Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung" ermittelt und einer inversen Fourier-Transformation unterzogen. Die vorliegende Erfindung ist jedoch nicht auf diese Vorgehensweise beschränkt. Nach Lösen der Gleichungen der Momentenmethode kann auch sofort die inverse Fourier-Transformation auf den berechneten Oberwellenstrom angewendet werden, um den entsprechenden Strom im Zeitbereich zu ermitteln, wobei anschließend im Zeitbereich die oben genannten Verfahrensschritte "Berechnung einer Spannung", "Berechnung eines elektromagnetischen Feldes", "Berechnung einer zwischen Leitern anliegenden Spannung" und "Berechnung der Kopplung einer Übertragungsleitung" durchgeführt werden.

Einer der Tests für elektronische Vorrichtungen besteht darin, die Beeinflussung der elektronischen Vorrichtung durch ein von einer Antenne abgestrahltes elektrisches Feld zu untersuchen (sogenannter Immunitätstest).

Dieser Test wird beispielsweise wie in Fig. 42 gezeigt durchgeführt, wobei ein Trägersignal, welches eine Frequenz zwischen 30MHz und 1GHz aufweist, mit einer Modulationswelle mit einer Frequenz von 1kHz und einem Modulationsgrad von 80% moduliert und anschließend die elektronische Vorrichtung mit der modulierten Welle bestrahlt wird.

Soll dieser Test mit dem oben beschriebenen Verfahren durchgeführt werden, wird der Umfang der zu verarbeitenden zeitlichen Daten der Wellenquelle äußerst hoch. Dies liegt daran, daß  $20 \times 10^6$  Punkte notwendig sind, wenn beispielsweise bei einer Modulationsfrequenz von 1kHz eine 1GHz-Periode in 20 Punkte unterteilt werden soll.

Daher wird in diesem Fall die Tatsache berücksichtigt, daß die Wellenquelle der Antenne, wie in Fig. 43 gezeigt, folgendermaßen in drei Wellenquellen mit unterschiedlichen Frequenzen aufgeteilt werden kann, wobei  $\omega_c$  die Kreisfrequenz des Trägersignals,  $V_c$  die Amplitude des Trägersignals,  $\omega_m$  die Kreisfrequenz der Modulationswelle und  $m$  den Modulationsgrad der Modulationswelle bezeichnet:

$$\text{Formel 4: } V = V_c(1 + m \sin \omega_m t) \sin \omega_c t \\ = V_c \sin \omega_c t + (m V_c / 2) \cos(\omega_c - \omega_m) t - (m V_c / 2) \cos(\omega_c + \omega_m) t$$

(Dabei wurde die Beziehung " $\cos t = j \sin t$ " berücksichtigt)

Die Momentenmethode wird nacheinander für diese drei Wellenquellen durchgeführt.

Wurden mit Hilfe dieser Momentenmethode die in dem Element  $m$  fließenden Ströme im Frequenzbereich gemäß Fig. 44A ermittelt, können die entsprechenden Ströme im Zeitbereich wie in Fig. 44B dargestellt abgeleitet und addiert werden, um den in dem Element  $m$  fließenden Strom zu berechnen.

Somit kann bei einer Wellenquelle, die eine durch Modulation eines Trägersignals erzeugte Welle aussendet, der in jedem Element fließende elektrische und magnetische Strom im Zeitbereich ohne Anwendung der Fourier-Transformation ermittelt werden. Daher kann auch die in einem bestimmten Element auftretende Spannung und das in einem bestimmten Element auftretende elektrische und magnetische Feld im Zeitbereich anhand der im Zeitbereich vorliegenden und wie oben dargestellt ermittelten elektrischen und magnetischen Ströme vor deren Kombination oder nach deren Kombination ermittelt werden, so daß der Einfluß der Wellenquelle auf die elektronische Vorrichtung simuliert werden kann.

So kann beispielsweise der in einem bestimmten Element fließende Strom im Zeitbereich durch Kombination der im Zeitbereich ermittelten Ströme berechnet und die zwischen Leitern anliegende Spannung im Zeitbereich anhand der Gleichung für die an einem imaginär zwischen die Leiter eingefügten Widerstand auftretende Spannung berechnet werden, wenn dieser Widerstand unendlich groß gewählt wird. Die im Zeitbereich vorliegenden Ströme können vor deren Kombination ausgewertet und der in einer Empfangsschaltung etc. einer Übertragungsleitung auftretende Strom und die entsprechende Spannung im Frequenzbereich anhand der Gleichung von "C. D. Taylor" berechnet werden, wobei die berechneten Werte anschließend kombiniert werden, so daß der in der Empfangsschaltung etc. der Übertragungsleitung aufgrund der Wellenquelle hervorgerufene Strom und die entsprechende Spannung im Zeitbereich ermittelt werden.

Auf diese Weise kann mit hoher Geschwindigkeit der Test simuliert werden, ob eine elektronische Vorrichtung von der Strahlung eines von der in Fig. 42 gezeigten Antenne erzeugten elektrischen Feldes beeinflusst wird.

Wie oben beschrieben worden ist, werden erfindungsgemäß die gegenseitige Impedanz, die gegenseitige Admittanz und die Wechselwirkung bei der Ausführung der Momentenmethode durch die Anwendung von Näherungsgleichungen mit äußerst hoher Geschwindigkeit berechnet. Ist eine sich zeitlich ändernde Wellenquelle gegeben, werden anschließend die Ergebnisse der Berechnung in den Frequenzbereich transformiert. Anschließend kann ein Verfahren angewendet werden, bei dem die in dem Transformations-Frequenzbereich vorliegenden Intensitäten des elektromagnetischen Feldes etc. mit Hilfe der Momentenmethode simuliert werden, wobei das Simulationsergebnis in den Zeitbereich zurücktransformiert wird.

Auf diese Weise kann erfindungsgemäß im Zeitbereich der Einfluß einer Wellenquelle auf eine elektronische Vorrichtung simuliert werden. Dementsprechend kann untersucht werden, warum eine elektronische Vorrichtung ungewünschte Radiowellen oder ein ungewünschtes Rauschen abstrahlt und warum Fehlfunktionen in einer elektronischen Vorrichtung aufgrund der Radiowellen oder des Rauschens auftreten.

Erfindungsgemäß kann somit auf einfache Art und Weise durch Anwendung der Momentenmethode der Einfluß einer Wellenquelle, die eine durch Modulation eines Trägersignals erzeugte Welle absendet, auf eine elektronische Vorrichtung im Zeitbereich simuliert werden.

5 Daher kann durch die Anwendung der vorliegenden Erfindung an einem Arbeitsplatz untersucht werden, ob in einer elektronischen Vorrichtung eine Fehlfunktion aufgrund eines von einer Antenne erzeugten und auf die elektronische Vorrichtung einwirkenden elektrischen Feldes auftritt oder nicht.

#### Patentansprüche

- 10 1. Simulationsvorrichtung (1), welche die Momentenmethode anwendet und eine elektronische Vorrichtung in Elemente aufteilt und für vorgegebene Frequenzen eine zwischen den Elementen auftretende gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) berechnet und die gegenseitige Impedanz sowie die den Elementen entsprechenden Wellenquellen zur Simulation des in jedem Element fließenden Stromes gemäß der Momentenmethode verwendet, gekennzeichnet durch
- 15 Transformationsmittel (11) zum Auffinden eines Frequenzspektrums, indem eine zeitliche Datenfolge einer Wellenquelle unterteilt und darauf die Fourier-Transformation angewendet wird, und zum Vorgeben des gesamten Frequenzspektrums oder eines Teils des Frequenzspektrums sowie die von diesem Spektrum umfaßten Frequenzen als Verarbeitungsobjekt,
- 20 Berechnungsmittel (12) zum Auswählen einer Abtastfrequenz unter Berücksichtigung der von den Transformationsmitteln (11) vorgegebenen Frequenzen, Berechnen der gegenseitigen Impedanz für die Abtastfrequenz, Ermitteln einer Näherungsgleichung für die gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) anhand der berechneten gegenseitigen Impedanz und der Abtastfrequenz, und Berechnen der gegenseitigen Impedanz für bestimmte von den Transformationsmitteln (11) vorgegebene Frequenzen anhand der Näherungsgleichung,
- 25 Simulationsmittel (13) zum Ermitteln des in jedem der Elemente fließenden Stromspektrums durch Anwendung der Momentenmethode anhand der durch die Berechnungsmittel (12) berechneten gegenseitigen Impedanz und des von den Transformationsmitteln (11) vorgegebenen Frequenzspektrums, und
- Inverse-Transformationsmittel (14) zum Anwenden der inversen Fourier-Transformation auf das von den Simulationsmitteln (13) ermittelte Stromspektrum und zum Ausgeben des Ergebnisses.
- 30 2. Simulationsvorrichtung (1), welche die Momentenmethode anwendet und eine elektronische Vorrichtung in Elemente aufteilt und für vorgegebene Frequenzen eine zwischen den Elementen auftretende gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) und die gegenseitige Impedanz sowie die den Elementen entsprechenden Wellenquellen zur Simulation des in jedem Element fließenden Stromes gemäß der Momentenmethode verwendet, gekennzeichnet durch
- 35 Transformationsmittel (11) zum Auffinden eines Frequenzspektrums, indem eine zeitliche Datenfolge einer Wellenquelle unterteilt und darauf die Fourier-Transformation angewendet wird, und zum Vorgeben des gesamten Frequenzspektrums oder eines Teils des Frequenzspektrums sowie die von diesem Spektrum umfaßten Frequenzen als Verarbeitungsobjekt,
- 40 Berechnungsmittel (12) zum Auswählen einer Abtastfrequenz unter Berücksichtigung der von den Transformationsmitteln (11) vorgegebenen Frequenzen, Berechnen der gegenseitigen Impedanz für die Abtastfrequenz, Ermitteln einer Näherungsgleichung für die gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) anhand der berechneten gegenseitigen Impedanz und der Abtastfrequenz, und Berechnen der gegenseitigen Impedanz für bestimmte von den Transformationsmitteln (11) vorgegebene Frequenzen anhand der Näherungsgleichung,
- 45 Simulationsmittel (13) zum Ermitteln des in jedem der Elemente fließenden Stromspektrums durch Anwendung der Momentenmethode anhand der durch die Berechnungsmittel (12) berechneten gegenseitigen Impedanz und des von den Transformationsmitteln (11) vorgegebenen Frequenzspektrums, und, falls gewünscht, zum gleichzeitigen Ermitteln eines Spannungsspektrums, eines elektrischen Feldspektrums und eines magnetischen Feldspektrums anhand des Stromspektrums und zum Auswählen eines gewünschten Spektrums aus den ermittelten Spektren als Ausgabeobjekt, und
- 50 Inverse-Transformationsmittel (14) zum Anwenden der inversen Fourier-Transformation auf das von den Simulationsmitteln (13) zur Ausgabe ausgewählte Spektrum und zum Ausgeben des Ergebnisses.
3. Simulationsvorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß, falls das zwischen Leitern auftretende Spannungsspektrum zu ermitteln ist, die Simulationsmittel (13) das Spektrum der zwischen den Leitern auftretenden Spannung gemäß einer Berechnungsgleichung berechnen, die aus dem von einem imaginär zwischen den Leitern eingesetzten Widerstand erzeugten Spannungsspektrum abgeleitet ist,
- 55 wobei der Widerstandswert unendlich groß gewählt wird.
4. Simulationsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß, falls ein Strom- oder Spannungsspektrum an Anschlüssen einer Übertragungsleitung zu ermitteln ist, die Simulationsmittel (13) die Momentenmethode ohne Berücksichtigung der Übertragungsleitung ausführen, abhängig von dem Ergebnis der Momentenmethode das durch das Stromspektrum der untersuchten Elemente an den Anschlüssen auftretende elektrische Feld ermitteln und durch Anwendung des ermittelten elektrischen Feldes das an den Anschlüssen der Übertragungsleitung auftretende Strom- oder Spannungsspektrum anhand einer vorgegebenen Berechnungsgleichung berechnen.
- 60 5. Simulationsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß, falls die Anfangsspannung eines aufgeladenen Kondensators als Wellenquelle zu untersuchen ist, die Transformationsmittel (11) das periodische Signal der Anfangsspannung unterteilen und darauf die Fourier-Transformation anwenden, und
- 65 daß, falls der durch eine Induktivität fließende Anfangsstrom als Wellenquelle zu untersuchen ist, die Transformationsmittel (11) das periodische Signal des Anfangsstromes unterteilen und darauf die Fourier-

Transformation anwenden.

6. Simulationsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnungsmittel (12) zusätzlich zu der gegenseitigen Impedanz ( $Z_{ij}$ ) auch die gegenseitige Admittanz ( $Y_{ij}$ ) oder die Wechselwirkung ( $B_{ij}$ ) oder beide durch dasselbe Verfahren berechnen, daß die Simulationsmittel (13) ihre Funktion auch unter Berücksichtigung des magnetischen Stromspektrums in Kombination mit der von den Berechnungsmitteln (12) berechneten gegenseitigen Admittanz ( $Y_{ij}$ ) und Wechselwirkung ( $B_{ij}$ ) durchführen, und daß die Inverse-Transformationsmittel (14) die inverse Fourier-Transformation in Übereinstimmung mit den Simulationsmitteln (13) durchführen.

7. Simulationsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnungsmittel (12) eine zwischen einem Element i und einem Element j auftretende gegenseitige Impedanz  $Z_{ij}$  näherungsweise wie folgt berechnen:

$$Z_{ij} = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)]$$

wobei f die Frequenz, k die Wellenzahl,  $r_0$  den Abstand zwischen dem Element i und dem Element j sowie j den Imaginärteil bezeichnet.

8. Simulationsvorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnungsmittel (12) eine zwischen einem Element i und einem Element j auftretende gegenseitige Admittanz  $Y_{ij}$  näherungsweise wie folgt berechnen:

$$Y_{ij} = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)]$$

wobei f die Frequenz, k die Wellenzahl,  $r_0$  den Abstand zwischen dem Element i und dem Element j sowie j den Imaginärteil bezeichnet.

9. Simulationsvorrichtung nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Berechnungsmittel (12) eine zwischen einem Element i und einem Element j auftretende Wechselwirkung  $B_{ij}$  näherungsweise wie folgt berechnen:

$$B_{ij} = e^{-jkr_0} [(a_0 + a_1 f^2 + a_2 f^4 + a_3 f^6 + a_4 f^8 + \dots) + j(b_0 f + b_1 f^3 + b_2 f^5 + b_3 f^7 + b_4 f^9 + \dots)]$$

wobei f die Frequenz, k die Wellenzahl,  $r_0$  den Abstand zwischen dem Element i und dem Element j sowie j den Imaginärteil bezeichnet.

10. Simulationsvorrichtung (1), welche die Momentenmethode anwendet und eine elektronische Vorrichtung in Elemente aufteilt und für vorgegebene Frequenzen eine zwischen den Elementen auftretende gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) berechnet und die gegenseitige Impedanz sowie die den Elementen entsprechenden Wellenquellen zur Simulation des in jedem Element fließenden Stromes gemäß der Momentenmethode verwendet, gekennzeichnet durch

Trennmittel (21) zum Aufteilen einer Wellenquelle in drei Wellenquellen mit unterschiedlichen Frequenzen, die durch eine Trägersignalfrequenz und eine Modulationssignalfrequenz bestimmt werden, wobei eine durch Modulation des Trägersignals erhaltene Welle als Wellenquelle verwendet wird, Simulationsmittel (22) zum Ermitteln des in jedem der Elemente fließenden Stromes im Frequenzbereich durch Anwenden der Momentenmethode auf die durch die Trennmittel (21) aufgeteilten Wellenquellen, und Berechnungsmittel (23) zum Berechnen des Stromes im Zeitbereich anhand des durch die Simulationsmittel (22) ermittelten Stromes im Frequenzbereich.

11. Simulationsvorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Simulationsmittel (22) durch Anwendung der Momentenmethode auch den magnetischen Strom im Frequenzbereich ermitteln, wobei zusätzlich zu der gegenseitigen Impedanz ( $Z_{ij}$ ) auch die gegenseitige Admittanz ( $Y_{ij}$ ) oder die Wechselwirkung ( $B_{ij}$ ) oder beide berücksichtigt werden, und daß die Berechnungsmittel (23) anhand des von den Simulationsmitteln (22) ermittelten magnetischen Stromes im Frequenzbereich auch den magnetischen Strom im Zeitbereich berechnen.

12. Simulationsverfahren, welches die Momentenmethode anwendet und eine elektronische Vorrichtung in Elemente aufteilt und für vorgegebene Frequenzen eine zwischen den Elementen auftretende gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) berechnet und gemäß der Momentenmethode den in jedem Element fließenden Strom anhand der gegenseitigen Impedanz sowie den den Elementen entsprechenden Wellenquellen simuliert, gekennzeichnet durch

einen Verfahrensschritt (ST1) zum Auffinden eines Frequenzspektrums, indem eine zeitliche Datenfolge einer Wellenquelle unterteilt und darauf die Fourier-Transformation angewendet wird, und zum Vorgeben des gesamten Frequenzspektrums oder eines Teils des Frequenzspektrums sowie die von diesem Spektrum umfaßten Frequenzen als Verarbeitungsobjekt,

einen zweiten Verfahrensschritt (ST2) zum Auswählen einer Abtastfrequenz unter Berücksichtigung der in dem ersten Verfahrensschritt (ST1) vorgegebenen Frequenzen, Berechnen der gegenseitigen Impedanz für die Abtastfrequenz, Ermitteln einer Näherungsgleichung für die gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) anhand der berechneten gegenseitigen Impedanz und der Abtastfrequenz, und Berechnen der gegenseitigen Impedanz für bestimmte durch den ersten Verfahrensschritt (ST1) vorgegebene Frequenzen anhand der Näherungsgleichung,

einen dritten Verfahrensschritt (ST3) zum Ermitteln des in jedem der Elemente fließenden Stromspektrums durch Anwendung der Momentenmethode anhand der in dem zweiten Verfahrensschritt (ST2) berechneten

gegenseitigen Impedanz und des in dem ersten Verfahrensschritt (ST 1) vorgegeben Frequenzspektrums, und

einen vierten Verfahrensschritt (ST4) zum Anwenden der inversen Fourier-Transformation auf das in dem dritten Verfahrensschritt (ST3) ermittelte Stromspektrum und zum Ausgeben des Ergebnisses.

5 13. Simulationsverfahren, welches die Momentenmethode anwendet und eine elektronische Vorrichtung in Elemente aufteilt und für vorgegebene Frequenzen eine zwischen den Elementen auftretende gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) berechnet und gemäß der Momentenmethode den in jedem Element fließenden Strom anhand der gegenseitigen Impedanz sowie den den Elementen entsprechenden Wellenquellen simuliert, gekennzeichnet durch

10 einen Verfahrensschritt (ST 1) zum Auffinden eines Frequenzspektrums, indem eine zeitliche Datenfolge einer Wellenquelle unterteilt und darauf die Fourier-Transformation angewendet wird, und zum Vorgeben des gesamten Frequenzspektrums oder eines Teils des Frequenzspektrums sowie die von diesem Spektrum umfaßten Frequenzen als Verarbeitungsobjekt,

15 einen zweiten Verfahrensschritt (ST2) zum Auswählen einer Abtastfrequenz unter Berücksichtigung der in dem ersten Verfahrensschritt (ST1) vorgegebenen Frequenzen, Berechnen der gegenseitigen Impedanz für die Abtastfrequenz, Ermitteln einer Näherungsgleichung für die gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) anhand der berechneten gegenseitigen Impedanz und der Abtastfrequenz, und Berechnen der gegenseitigen Impedanz für bestimmte durch den ersten Verfahrensschritt (ST1) vorgegebene Frequenzen anhand der Näherungsgleichung,

20 einen dritten Verfahrensschritt (ST3—ST6) zum Ermitteln des in jedem der Elemente fließenden Stromspektrums durch Anwendung der Momentenmethode anhand der in dem zweiten Verfahrensschritt (ST2) berechneten gegenseitigen Impedanz und des in dem ersten Verfahrensschritt (ST1) vorgegeben Frequenzspektrums und, falls gewünscht, zum gleichzeitigen Ermitteln eines Spannungsspektrums, eines elektrischen Feldspektrums und eines magnetischen Feldspektrums anhand des Stromspektrums und zum Auswählen eines gewünschten Spektrums aus den ermittelten Spektren als Ausgabeobjekt, und

25 einen vierten Verfahrensschritt zum Anwenden der inversen Fourier-Transformation auf das von den Simulationsmitteln (13) zur Ausgabe ausgewählte Spektrum und zum Ausgeben des Ergebnisses.

14. Simulationsverfahren nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet,

30 daß in dem zweiten Verfahrensschritt (ST2) zusätzlich zu der gegenseitigen Impedanz ( $Z_{ij}$ ) auch die gegenseitige Admittanz ( $Y_{ij}$ ) oder die Wechselwirkung ( $B_{ij}$ ) oder beide durch daßelbe Verfahren berechnet werden,

daß der dritte Verfahrensschritt (ST3) auch unter Berücksichtigung des magnetischen Stromspektrums in Kombination mit der von den Berechnungsmitteln (12) berechneten gegenseitigen Admittanz ( $Y_{ij}$ ) und Wechselwirkung ( $B_{ij}$ ) durchgeführt wird, und

35 daß in dem vierten Verfahrensschritt (ST4) die inverse Fourier-Transformation in Übereinstimmung mit dem dritten Verfahrensschritt (ST3) durchgeführt wird.

15. Simulationsverfahren, welches die Momentenmethode anwendet und eine elektronische Vorrichtung in Elemente aufteilt und für vorgegebene Frequenzen eine zwischen den Elementen auftretende gegenseitige Impedanz ( $Z_{ij}$ ) berechnet und den in jedem Element fließenden Strom gemäß der Momentenmethode anhand der gegenseitigen Impedanz sowie den den Elementen entsprechenden Wellenquellen simuliert, gekennzeichnet durch

einen ersten Verfahrensschritt zum Aufteilen einer Wellenquelle in drei Wellenquellen mit unterschiedlichen Frequenzen, die durch eine Trägersignalfrequenz und eine Modulationssignalfrequenz bestimmt sind, wobei eine durch Modulation des Trägersignals erhaltene Welle als die Wellenquelle verwendet wird,

45 einen zweiten Verfahrensschritt zum Ermitteln des in jedem Element fließenden Stromes im Frequenzbereich durch Anwenden der Momentenmethode auf die in dem ersten Verfahrensschritt aufgeteilten Wellenquellen, und

einen dritten Verfahrensschritt zum Berechnen des Stromes im Zeitbereich anhand des in dem zweiten Verfahrensschritt ermittelten Stromes im Frequenzbereich.

16. Simulationsverfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet,

50 daß in dem zweiten Verfahrensschritt durch Anwendung der Momentenmethode auch der magnetischen Strom im Frequenzbereich ermittelt wird, wobei zusätzlich zu der gegenseitigen Impedanz ( $Z_{ij}$ ) auch die gegenseitige Admittanz ( $Y_{ij}$ ) oder die Wechselwirkung ( $B_{ij}$ ) oder beide berücksichtigt werden, und

55 daß in dem dritten Verfahrensschritt auch der magnetische Strom im Zeitbereich anhand des in dem zweiten Verfahrensschritt ermittelten magnetischen Stromes im Frequenzbereich berechnet wird.

Hierzu 44 Seite(n) Zeichnungen

Fig.1

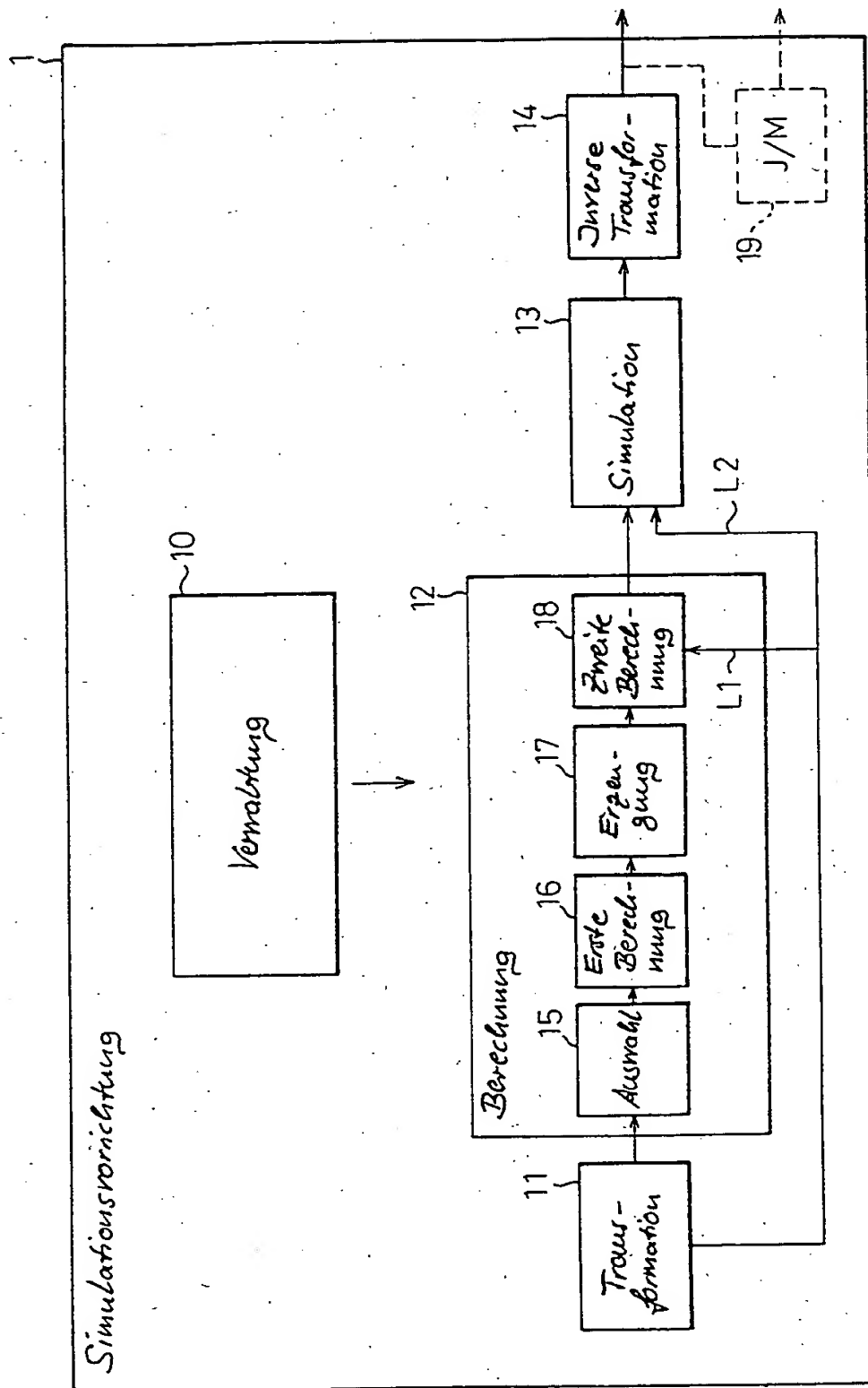


Fig.2

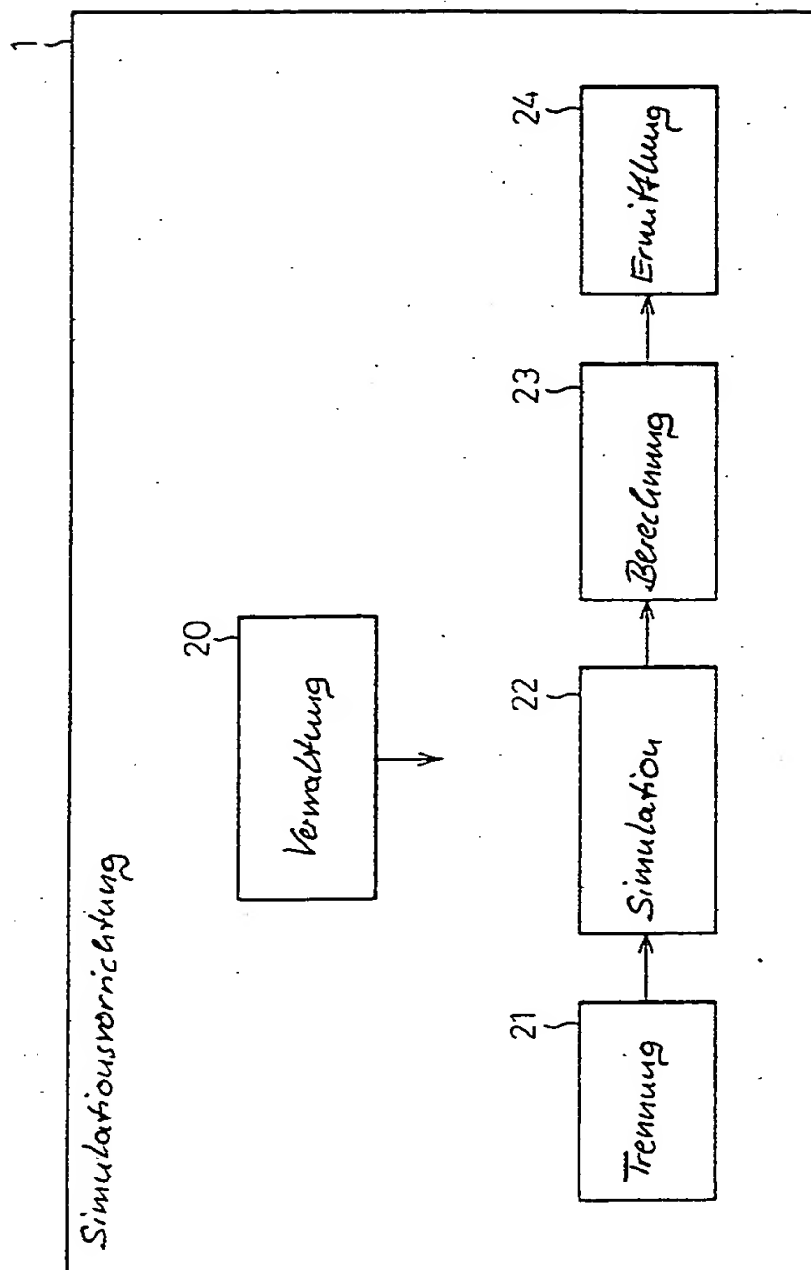


Fig.3

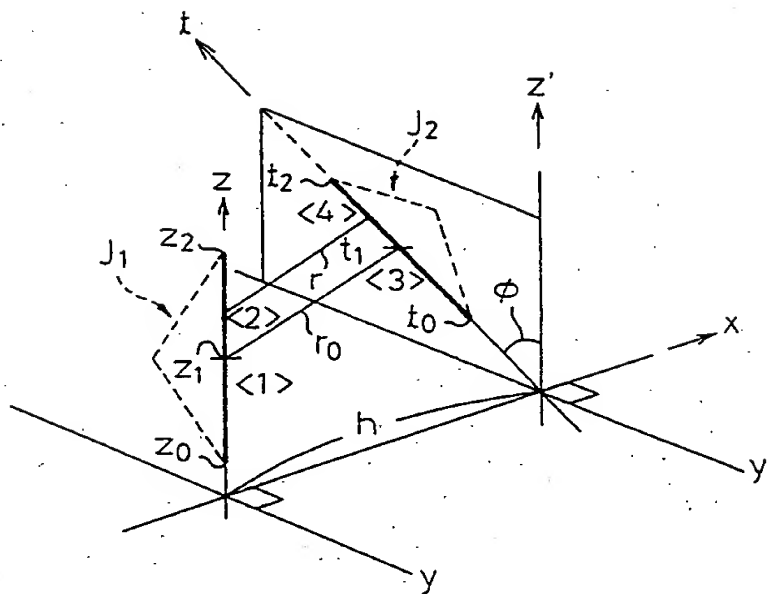


Fig. 4A

$$Z = j\omega \int \left[ \frac{\mu}{4\pi} J_1 J_2 \cos\phi \frac{e^{-jkr}}{r} + \frac{1}{4\pi\epsilon} \rho_1 \rho_2 \frac{e^{-jkr}}{r} \right] ds$$

Fig. 4B

$$\left. \begin{aligned} Z_{13} &= \frac{j\omega\mu}{4\pi \sin k d_1 \sin k d_3} \int_{t_1 z_1}^{t_2 z_1} \int_{t_0 z_0}^{t_1 z_1} [\sin k(z-z_0) \sin k(t-t_0) \cos\phi \\ &\quad - \cos k(z-z_0) \cos k(t-t_0)] \frac{e^{-jkr}}{r} dz dt \\ Z_{14} &= \frac{j\omega\mu}{4\pi \sin k d_1 \sin k d_4} \int_{t_1 z_1}^{t_2 z_1} \int_{t_1 z_0}^{t_2 z_1} [\sin k(z-z_0) \sin k(-t+t_2) \cos\phi_2 \\ &\quad + \cos k(z-z_0) \cos k(-t+t_2)] \frac{e^{-jkr}}{r} dz dt \end{aligned} \right\}$$



$$\text{Fig.5A} \left\{ \begin{aligned} \frac{j\omega\mu}{4\pi \sin kd_1 \sin kd_3} &= j \frac{c\mu}{4\pi} \frac{k}{\sin kd_1 \sin kd_3} = j\alpha \frac{k}{A_1} \\ \frac{j\omega\mu}{4\pi \sin kd_1 \sin kd_4} &= j \frac{c\mu}{4\pi} \frac{k}{\sin kd_1 \sin kd_4} = j\alpha \frac{k}{A_2} \end{aligned} \right.$$

$$\text{Fig.5B} \left\{ \begin{aligned} Z_{13} &= j\alpha \frac{k}{A_1} e^{-jk r_0} \int_{t_0, z_0}^{t_1, z_1} [\sin k(z-z_0) \sin k(t-t_0) \cos \phi \\ &\quad - \cos k(z-z_0) \cos k(t-t_0)] \frac{e^{-jk d}}{r} dz dt \\ Z_{14} &= j\alpha \frac{k}{A_1} e^{-jk r_0} \int_{t_1, z_0}^{t_2, z_1} [\sin k(z-z_0) \sin k(-t+t_2) \cos \phi_2 \\ &\quad + \cos k(z-z_0) \cos k(-t+t_2)] \frac{e^{-jk d}}{r} dz dt \end{aligned} \right.$$

Fig.6

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \alpha \frac{k}{A_i} \frac{t_j z_j}{t_o z_o} \int \int [\sin ku \sin kv \cos \phi_1 - \cos ku \cos kv] \frac{\sin kd}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_i} \frac{t_j z_j}{t_o z_o} \left\{ \left[ ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[ kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left[ 1 - \frac{(ku)^2}{2} \right] \left[ 1 - \frac{(kv)^2}{2} \right] \right\} \left[ kd - \frac{(kd)^3}{6} \right] \frac{1}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_i} \frac{t_j z_j}{t_o z_o} \left\{ \left[ uvk^2 - \frac{uv^3 + u^3 v}{6} k^4 + \frac{u^3 v^3}{36} k^6 \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left[ 1 - \frac{u^2 + v^2}{2} k^2 + \frac{u^2 v^2}{4} k^4 \right] \right\} \left[ kd - \frac{(kd)^3}{6} \right] \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

Fig. 7

$$\begin{aligned}
 = & \alpha \frac{1}{A_1} \int_{t_0}^{t_1} \int_{z_0}^{z_1} \left\{ \left[ uvd k^4 - \left( \frac{uv^3 + u^3v}{6} d + \frac{uvd^3}{6} \right) k^6 \right. \right. \\
 & + \left( \frac{u^3v^3}{36} d + \frac{(uv^3 + u^3v)d^3}{36} \right) k^8 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^{10} \left. \right] \cos \phi_1 \\
 & - dk^2 + \left( \frac{u^2+v^2}{2} d + \frac{d^3}{6} \right) k^4 - \left( \frac{u^2v^2}{4} d + \frac{u^2+v^2}{12} d^3 \right) k^6 \\
 & \left. + \frac{u^2v^2}{24} d^3 k^8 \right\} \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

Fig. 8

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \alpha \frac{k}{A_1} \int_0^{t_1} \int_0^{z_1} \int_0^{z_0} [\sin ku \sin kw \cos \phi_1 + \cos ku \cos kw] \frac{\cos kd}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \int_0^{t_1} \int_0^{z_1} \int_0^{z_0} \left\{ \left[ ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[ kw - \frac{(kw)^3}{6} \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left[ 1 - \frac{(ku)^2}{2} \right] \left[ 1 - \frac{(kw)^2}{2} \right] \right\} \left[ 1 - \frac{(kd)^2}{2} \right] \frac{1}{r} dz dt \\
 &= \alpha \frac{k}{A_1} \int_0^{t_1} \int_0^{z_1} \int_0^{z_0} \left\{ \left[ uwk^2 - \frac{uw^3 + u^3w}{6} k^4 + \frac{u^3w^3}{36} k^6 \right] \cos \phi_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left[ 1 + \frac{u^2 + w^2}{2} k^2 - \frac{u^2w^2}{4} k^4 \right] \right\} \left[ 1 - \frac{(kd)^2}{2} \right] \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

Fig. 9

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\alpha}{A_1} \int_{t_0}^{t_1} \int_{z_0}^{z_1} \left\{ [u w k^3 - \left( \frac{u w^3 + u^3 w}{6} + \frac{u w d^2}{2} \right) k^5 \right. \\
 &\quad + \left( \frac{u^3 w^3}{36} + \frac{u w^3 + u^3 w}{12} d^2 \right) k^7 - \frac{u^3 w^3}{72} d^2 k^9] \cos \phi, \\
 &\quad - k + \left( \frac{u^2 + w^2}{2} + \frac{d^2}{2} \right) k^3 - \left( \frac{u^2 w^2}{4} + \frac{u^2 + w^2}{4} d^2 \right) k^5 \\
 &\quad \left. + \frac{u^2 w^2}{8} d^2 k^7 \right\} \frac{1}{r} dz dt
 \end{aligned}$$

Fig.10

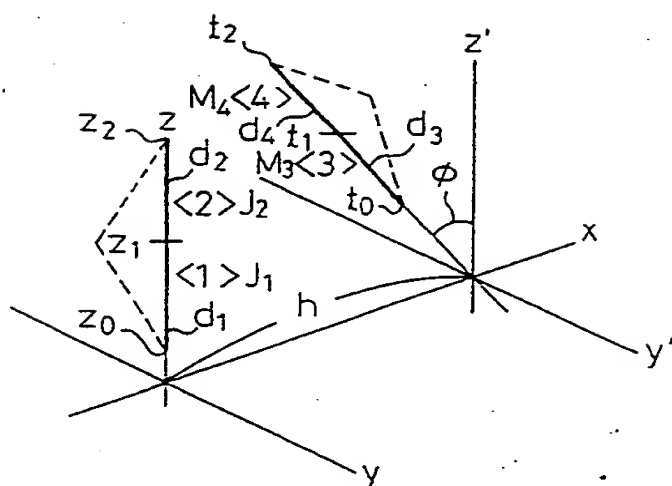


Fig.11A

Einheitsvektoren:

$$\text{Einpol } \langle 1 \rangle (s_x, s_y, s_z) = (0, 0, 1)$$

$$\text{Einpol } \langle 3 \rangle (t_x, t_y, t_z) = (\sin \phi_1, 0, \cos \phi_1)$$

$$\text{Einpol } \langle 4 \rangle (\sin \phi_2, 0, \cos \phi_2)$$

$$\varphi\text{-Richtung } (v_x, v_y, v_z) = (x/\rho, h/\rho, 0)$$

$$\phi\text{-Richtung } (w_x, w_y, w_z) = (-h/\rho, x/\rho, 0)$$

Fig.11B

$$H\phi = \frac{1}{\mu} \nabla \times A = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial A_\rho}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \right)$$

$$\text{since } A_\rho = 0 \quad H\phi = - \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho}$$

Fig.11C

$$B = -h \int_t^M \frac{H\phi}{\rho} \sin \phi \, hdt$$

$$= \frac{h}{\mu} \int_t^M \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \sin \phi \, hdt$$

Fig.12

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{J e^{-jkr}}{r} dz$$

$$\rho = (x^2 + h^2)^{1/2}$$

$$r = \{\rho^2 + (z - z')^2\}^{1/2} = (z^2 + t^2 - 2zt \cos \phi + h^2)^{1/2}$$

$z'$ : z-Koordinate der Einpole <3> und <4>

$$\frac{dr}{d\rho} = \frac{\rho}{r}$$

$$\frac{\partial A_z}{\partial \rho} = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{J}{z} \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{e^{-jkr}}{r} dz$$

$$= \int \frac{J}{z} \left( -jk \frac{\rho}{r^2} e^{-jkr} - \frac{\rho}{r^3} e^{-jkr} \right) dz$$



$$\text{Fig.13A} \left\{ \begin{aligned} B &= \frac{h}{4\pi} \int_t \int_z J M \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \frac{e^{-jkr}}{r} \sin \phi \, dz dt \\ &= \frac{h \sin \phi}{4\pi} \int_t \int_z J M \left[ -\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jkr} \, dz dt \end{aligned} \right.$$

$$\text{Fig.13B} \quad B \cong \frac{h \sin \phi}{4\pi} e^{-jkr_0} \int_t \int_z M J \left[ -\frac{jk}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-jkd} \, dz dt$$

Fig.14

$$B_{13} = \frac{h_1 \sin \phi_1}{4 \pi \sin k d_1 \sin k d_3} e^{-j k r_0} \int_t \int_z \sin k(z-z_0) \times \\ \sin k(t-t_0) \left[ -\frac{j k}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-j k d} dz dt$$

$$B_{14} = \frac{h_2 \sin \phi_2}{4 \pi \sin k d_1' \sin k d_4} e^{-j k r_0} \int_t \int_z \sin k(z-z_0) \times \\ \sin k(t_2-t) \left[ -\frac{j k}{r^2} - \frac{1}{r^3} \right] e^{-j k d} dz dt$$

Fig.15

$$\begin{aligned}
 & \int_t \int_z \sin ku \sin kv \left[ -\frac{1}{r^3} \right] e^{-jkd} dz dt \\
 &= - \int_t \int_z \left[ ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[ kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \times [\cos kd - j \sin kd] \frac{1}{r^3} dz dt \\
 &= - \int_t \int_z \left\{ \left[ ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[ kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \left[ 1 - \frac{(kd)^2}{2} \right] \right. \\
 &\quad \left. - j \left[ ku - \frac{(ku)^3}{6} \right] \left[ kv - \frac{(kv)^3}{6} \right] \times \left[ kd - \frac{(kd)^3}{6} \right] \right\} \frac{1}{r^3} dz dt
 \end{aligned}$$

Fig.16

$$\begin{aligned}
 &= - \int_t \int_z \left\{ uvk^2 - \frac{u^3v + uv^3 + 3uvd^2}{6} k^4 \right. \\
 &\quad + \frac{u^3v^3 + 3u^3vd^2 + 3uv^3d^2}{36} k^6 - \frac{u^3v^3d^2}{72} k^8 \\
 &\quad - j \left[ uvdk^3 - \frac{u^3vd + uv^3d + uvd^3}{6} k^5 \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{u^3v^3d + u^3vd^3 + uv^3d^3}{36} k^7 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^9 \right] \right\} \frac{1}{r^3} dz dt
 \end{aligned}$$

Fig.17

$$\begin{aligned}
 &\int_t \int_z \sin ku \sin kv \left[ - \frac{jk}{r^2} \right] e^{-jk d} dz dt \\
 &= - \int_t \int_z \left\{ uvk^2 - \frac{u^3v + uv^3 + 3uvd^2}{6} k^4 \right. \\
 &\quad + \frac{u^3v^3 + 3u^3vd^2 + 3uv^3d^2}{36} k^6 - \frac{u^3v^3d^2}{72} k^8 \\
 &\quad - j \left[ uvdk^3 - \frac{u^3vd + uv^3d + uvd^3}{6} k^5 \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{u^3v^3d + u^3vd^3 + uv^3d^3}{36} k^7 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^9 \right] \right\} \frac{jk}{r^2} dz dt
 \end{aligned}$$

Fig.18

$$\begin{aligned}
 = & - \int_t \int_z \left\{ uvdk^4 - \frac{u^3vd + uv^3d + uvd^3}{6} k^6 \right. \\
 & + \frac{u^3v^3d + u^3vd^3 + uv^3d^3}{36} k^8 - \frac{u^3v^3d^3}{216} k^{10} \\
 & + j \left[ uvk^3 - \frac{u^3v + uv^3 + 3uvd^2}{6} k^5 \right. \\
 & \left. \left. + \frac{u^3v^3 + 3u^3vd^2 + 3uv^3d^2}{36} k^7 - \frac{u^3v^3d^2}{72} k^9 \right] \right\} \frac{1}{r^2} dzdt
 \end{aligned}$$

Fig.19

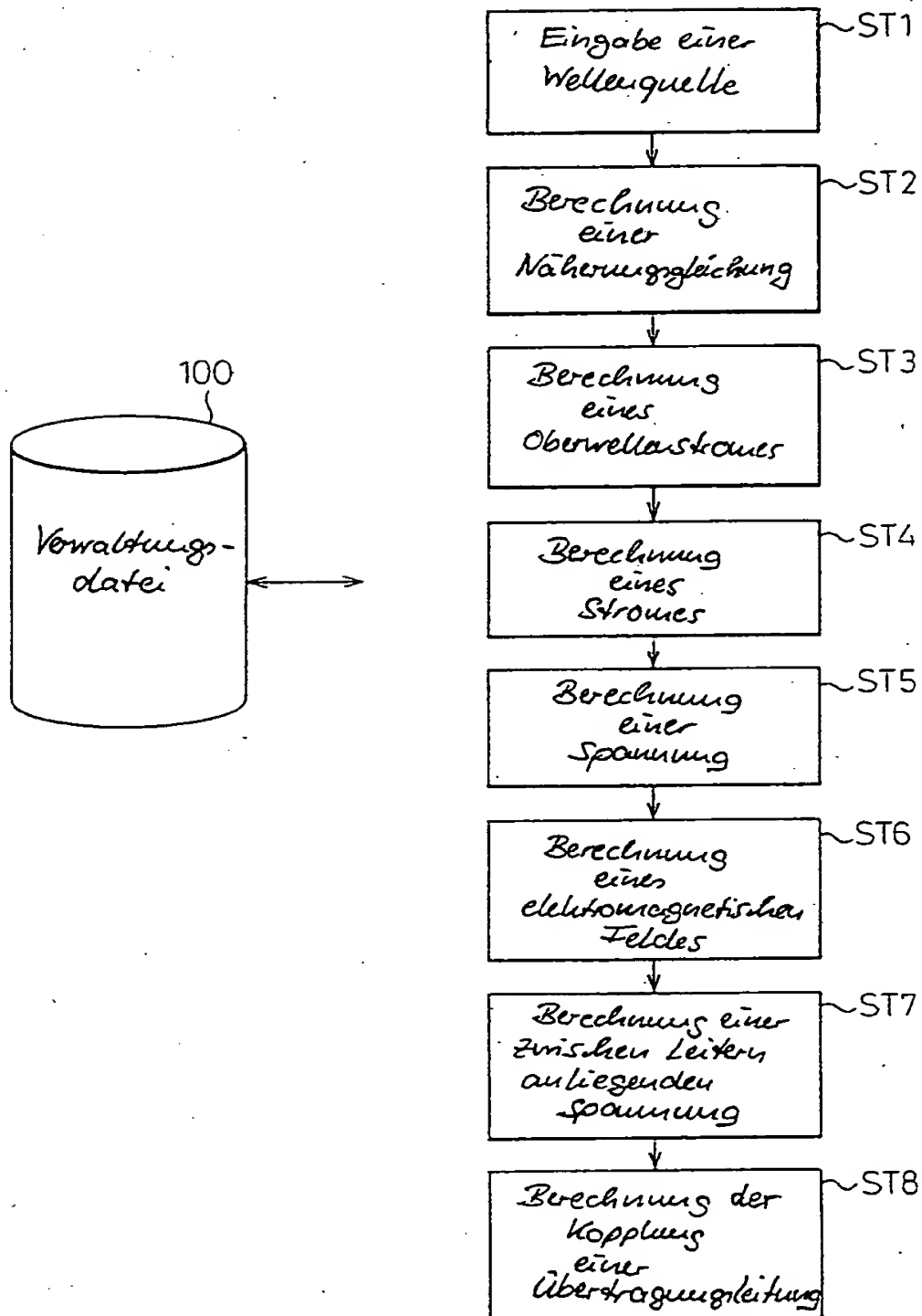
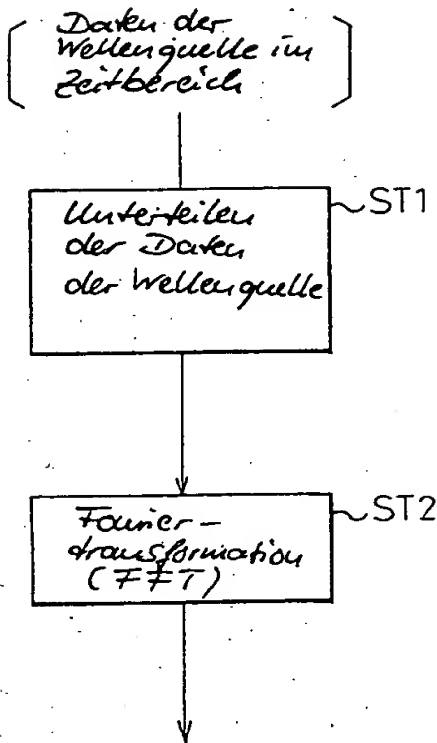


Fig. 20



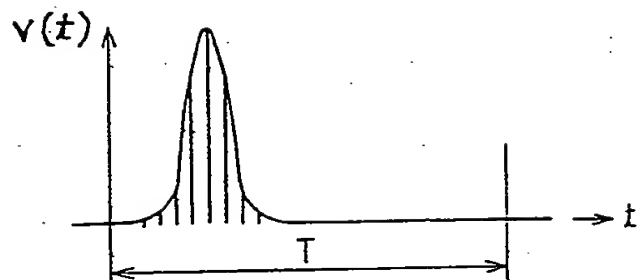
Analyse von  $v(t)$  oder  $i(t)$   
 über den Zeitbereich  $t = 0 - T$   
 mit  $N$  Zeitschritten

$v(t_1), v(t_2), \dots, v(t_N)$  oder  
 $i(t_1), i(t_2), \dots, i(t_N)$ ,  
 wobei  $t_1 = 0, t_N = T$

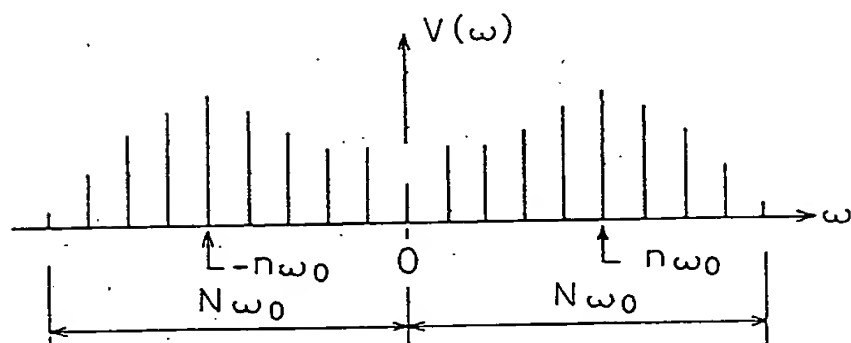
$V(f_1), V(f_2), \dots, V(f_n), \dots, V(f_N)$ ,  
 wobei  $f_0 = 1/T, f_n = n \cdot f_0, n = 1 \dots N$

• Analog für die negativen Seitenfrequenzen  
 (Spektrum von  $i(t)$  ist nicht dargestellt).

Fig.21



$T$ : Periode



$$\omega_0 = 2\pi/T$$



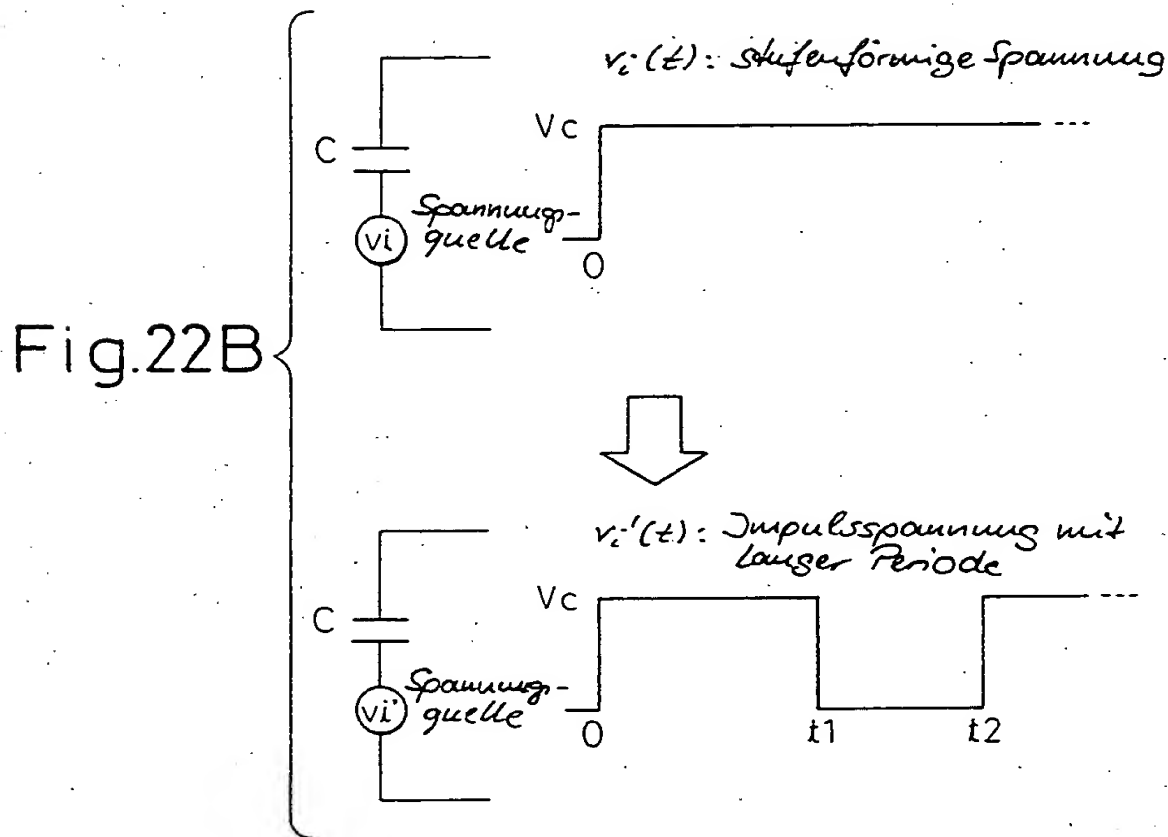
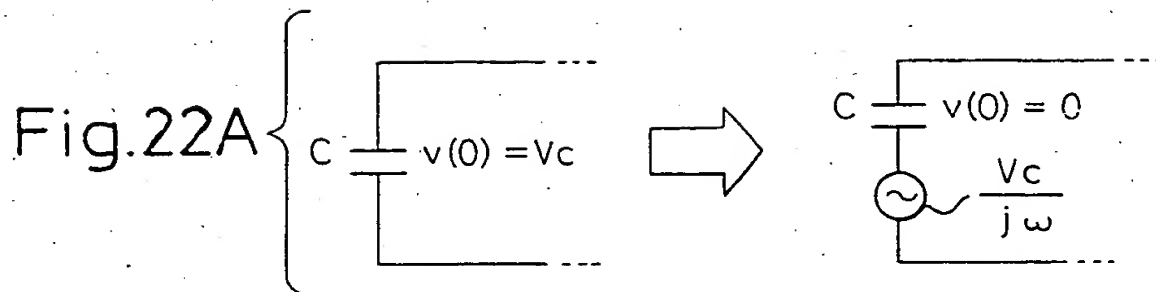


Fig.23A

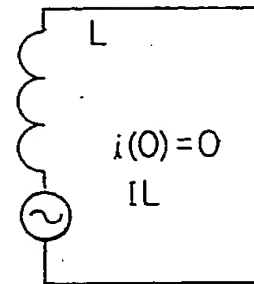
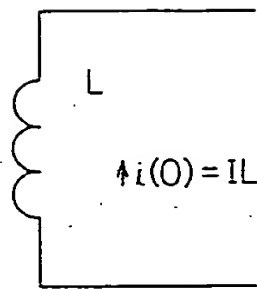


Fig.23B

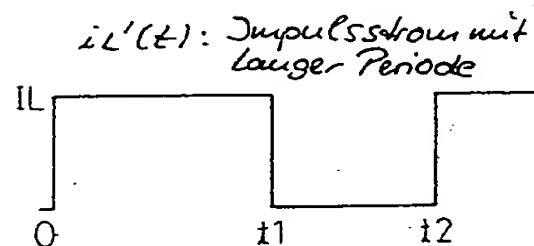
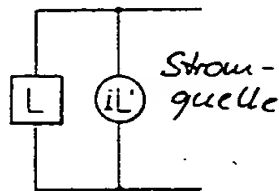
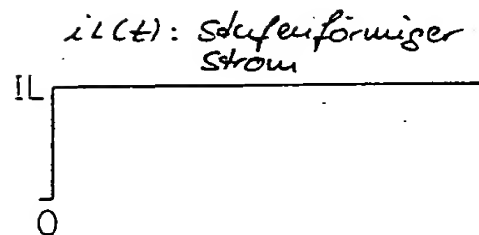
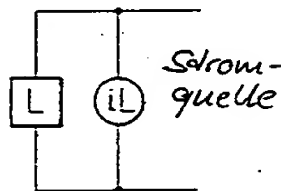


Fig. 24

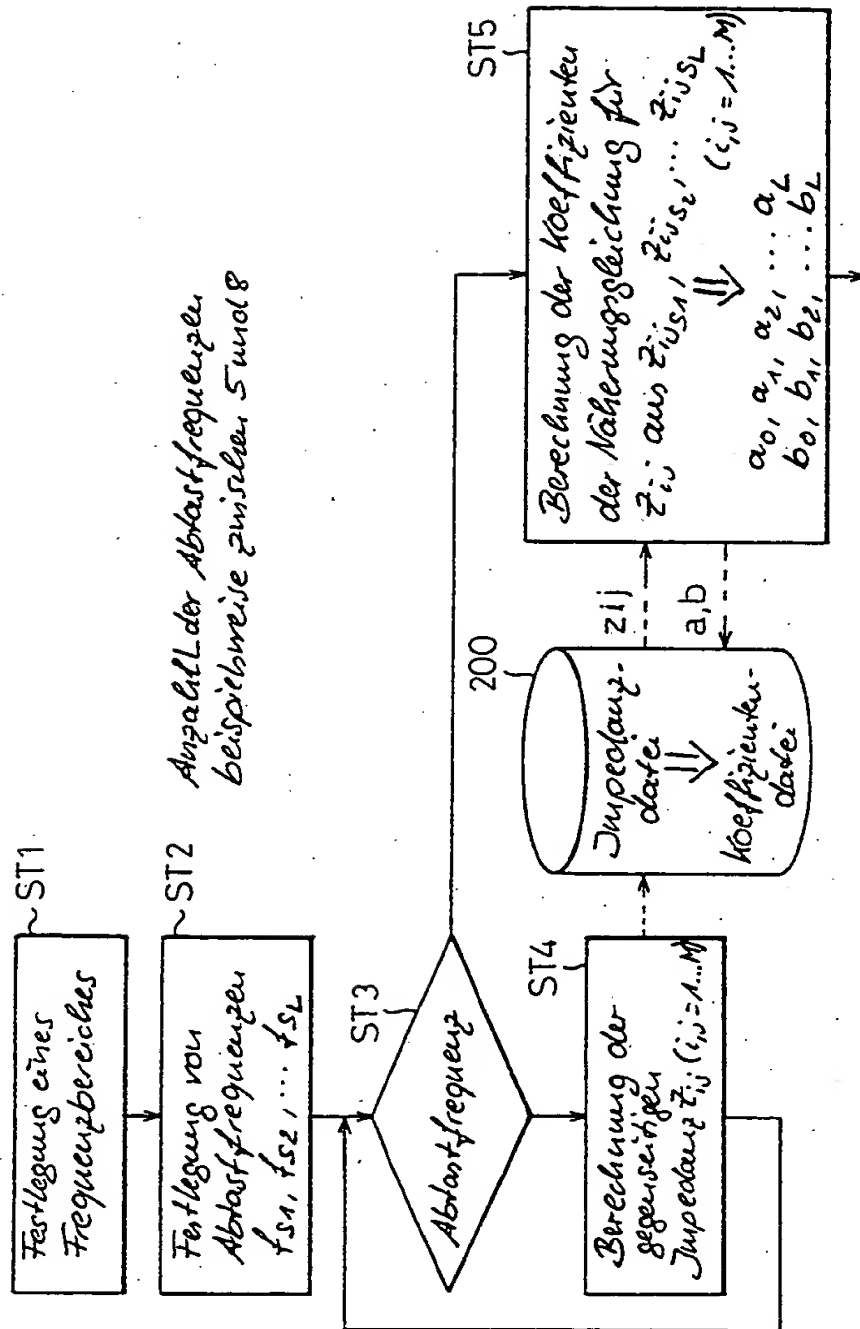


Fig.25

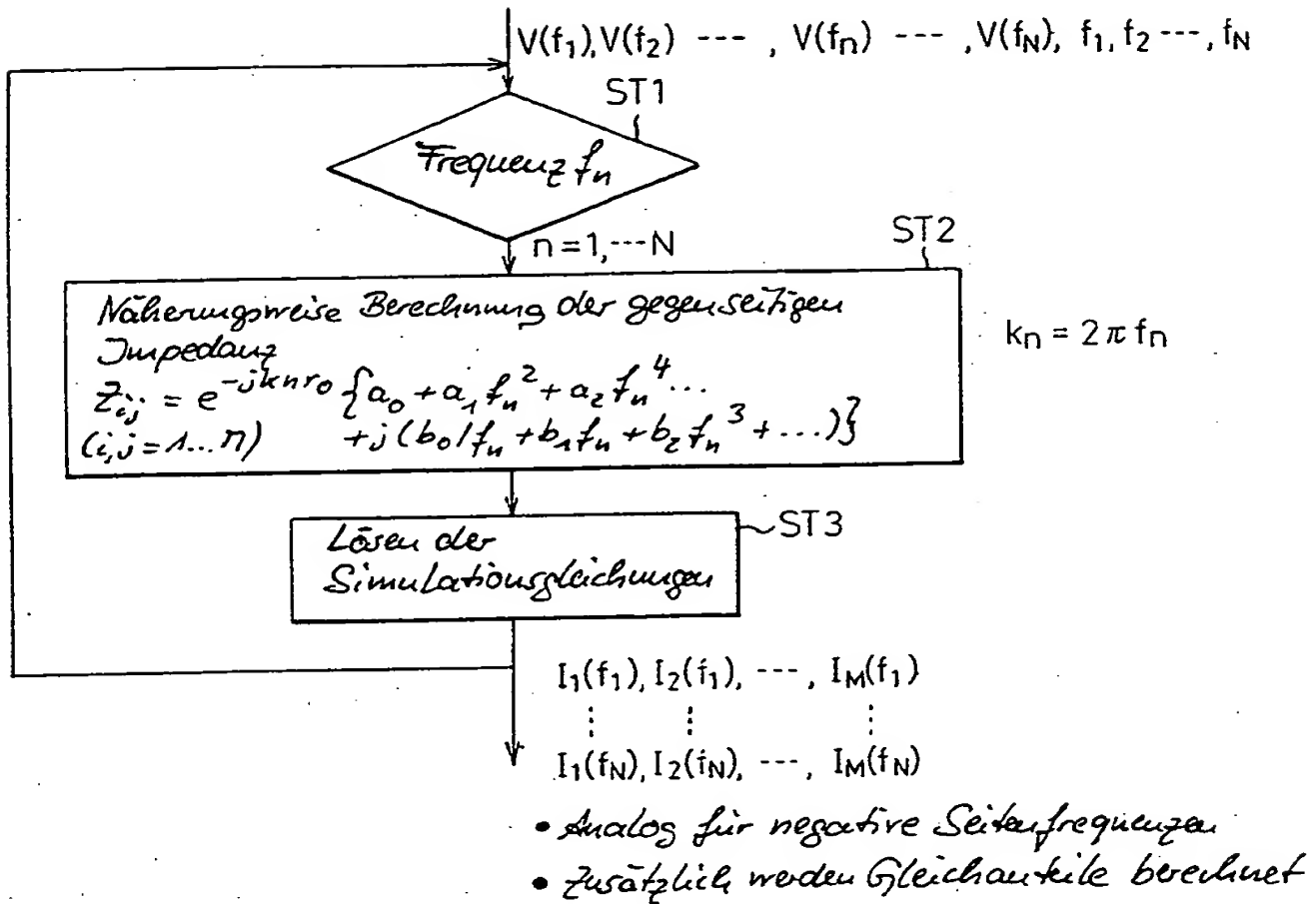


Fig.26

$$\begin{bmatrix}
 Z_{11}(\omega) & Z_{12}(\omega) & \dots & Z_{1M}(\omega) \\
 Z_{21}(\omega) & Z_{22}(\omega) & \dots & Z_{2M}(\omega) \\
 \vdots & \vdots & & \vdots \\
 Z_{M1}(\omega) & Z_{M2}(\omega) & \dots & Z_{MM}(\omega)
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 I_1(\omega) \\
 \vdots \\
 I_m(\omega) \\
 \vdots \\
 I_M(\omega)
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 \vdots \\
 V(\omega) \\
 \vdots \\
 0
 \end{bmatrix}$$

Fig.27

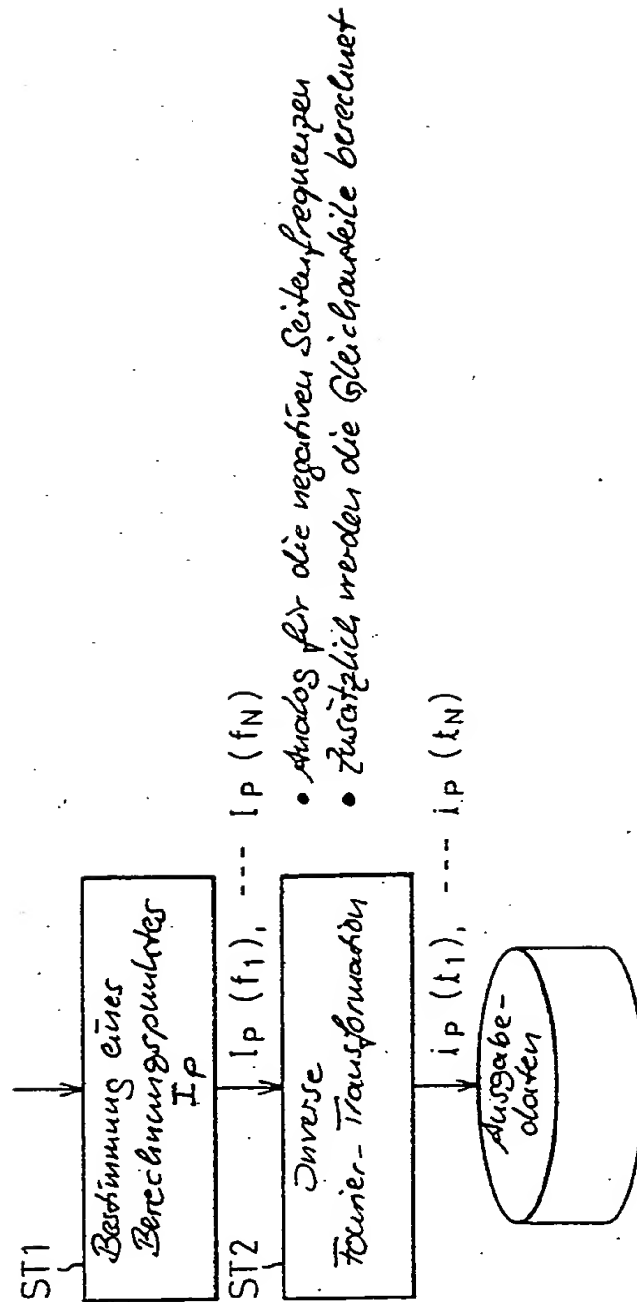


Fig. 28

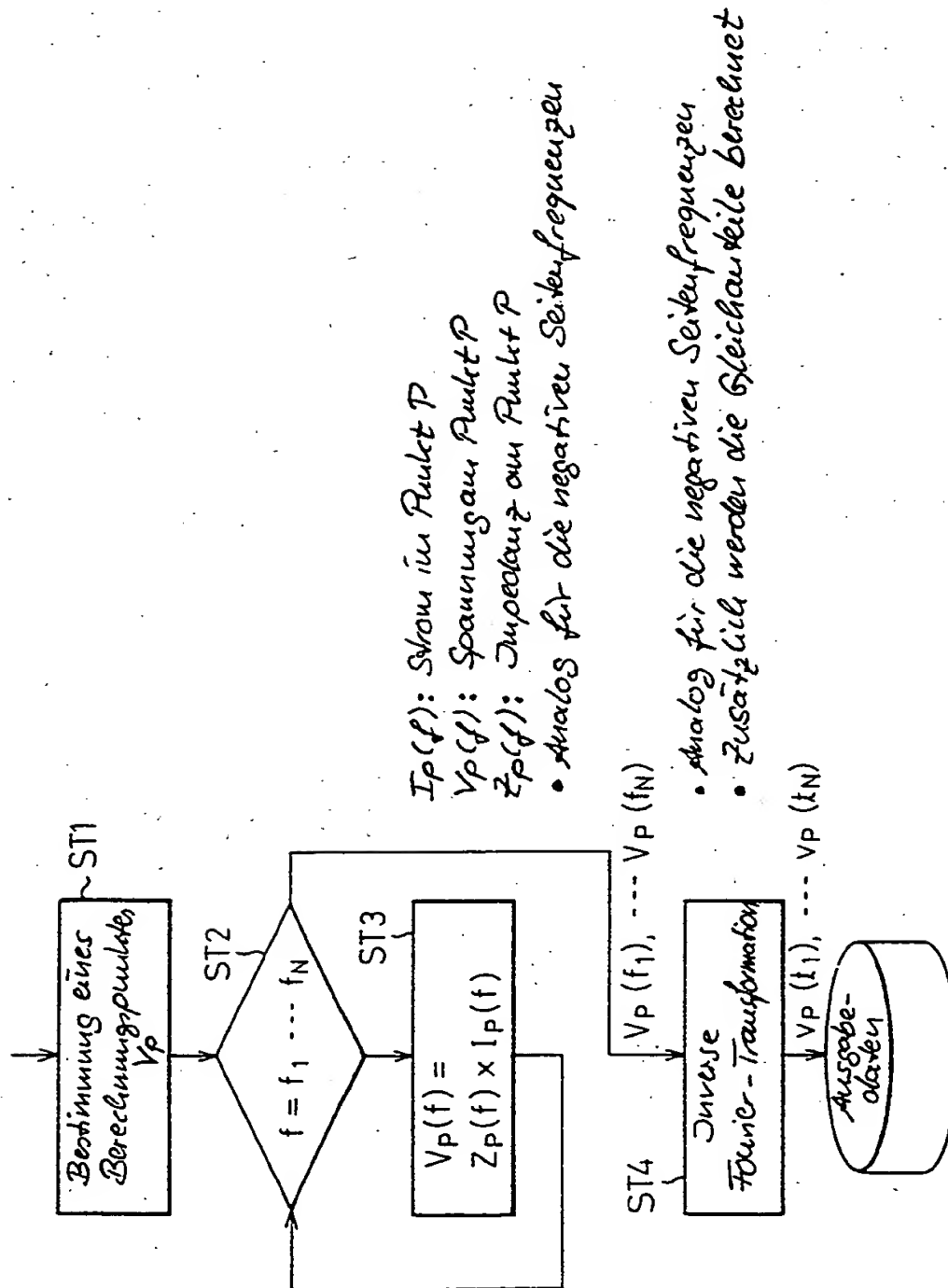


Fig.29

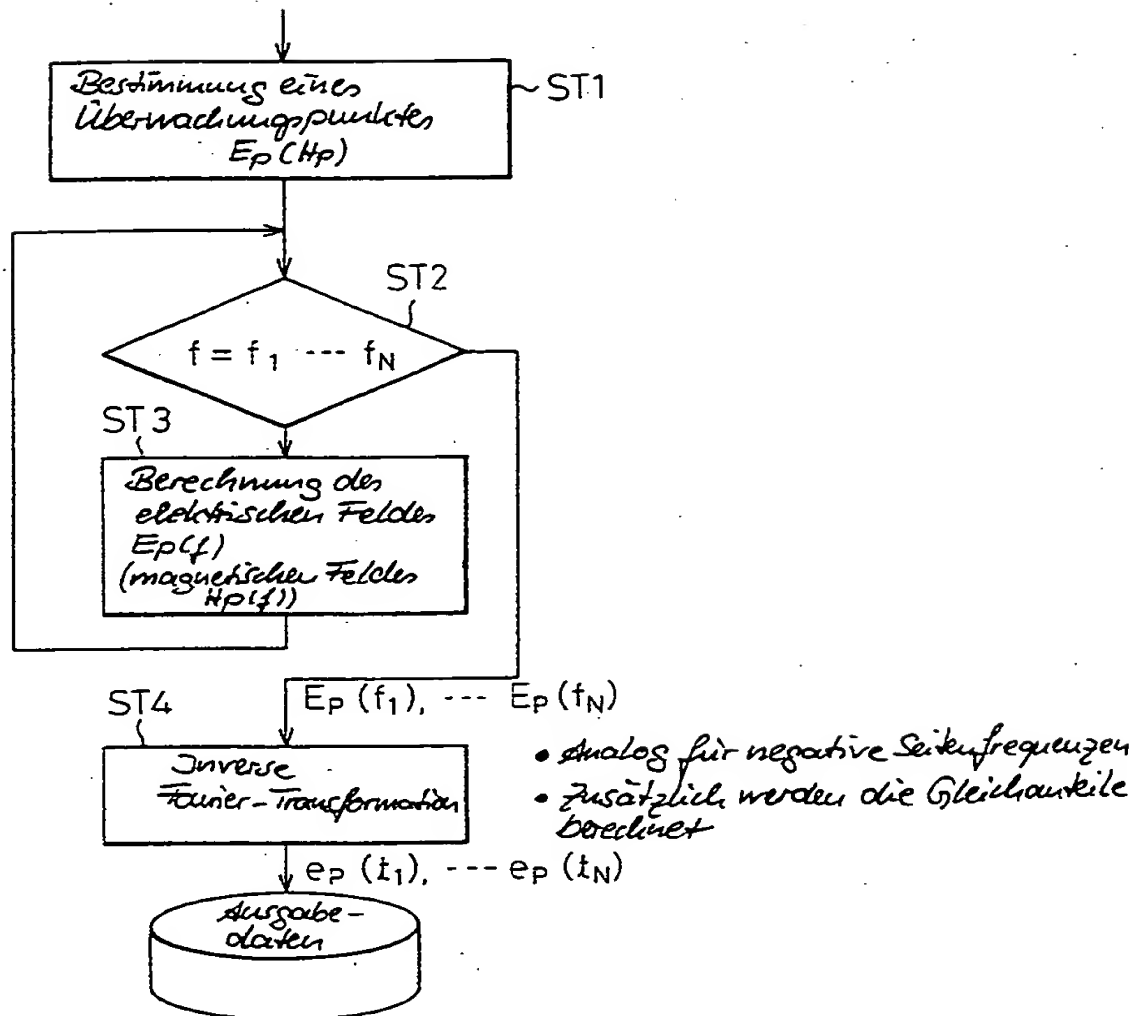
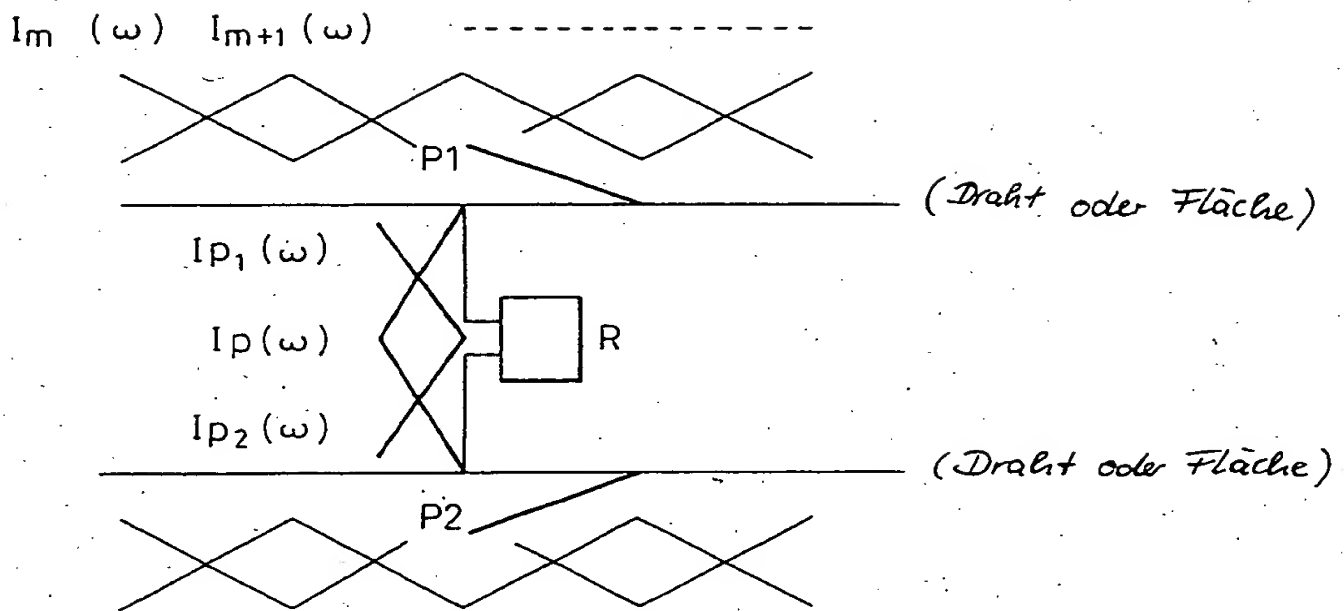




Fig. 30



$$\text{Fig. 31A} \quad I_P(Z_{PP}+R) + I_{P1}Z_{PP1} + I_{P2}Z_{PP2} + \sum_{n=1}^M I_n Z_{Pn} = 0$$

$$\text{Fig. 31B} \quad I_P = \frac{-1}{Z_{PP}+R} [I_{P1}Z_{PP1} + I_{P2}Z_{PP2} + \sum_{n=1}^M I_n Z_{Pn}]$$

$$\text{Fig. 31C} \quad V_P = I_P R = \frac{-R}{Z_{PP}+R} [I_{P1}Z_{PP1} + I_{P2}Z_{PP2} + \sum_{n=1}^M I_n Z_{Pn}]$$

Fig.32

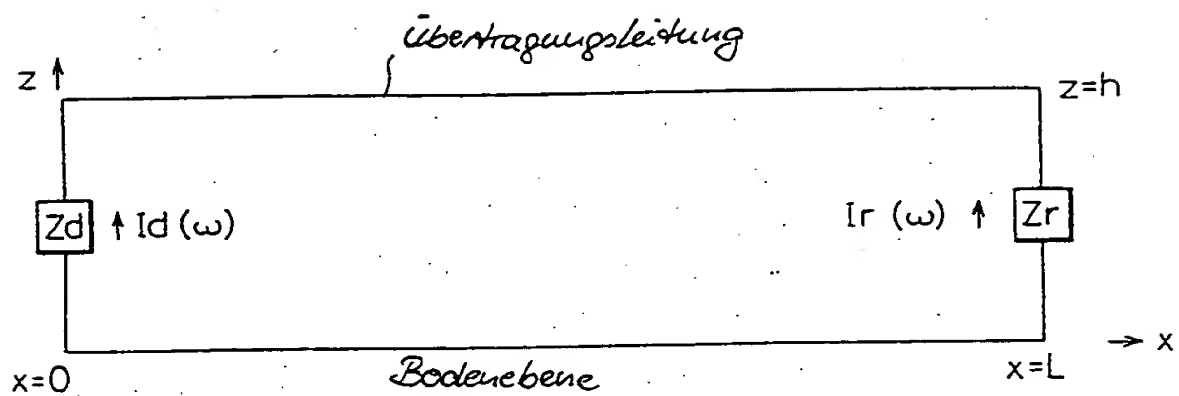
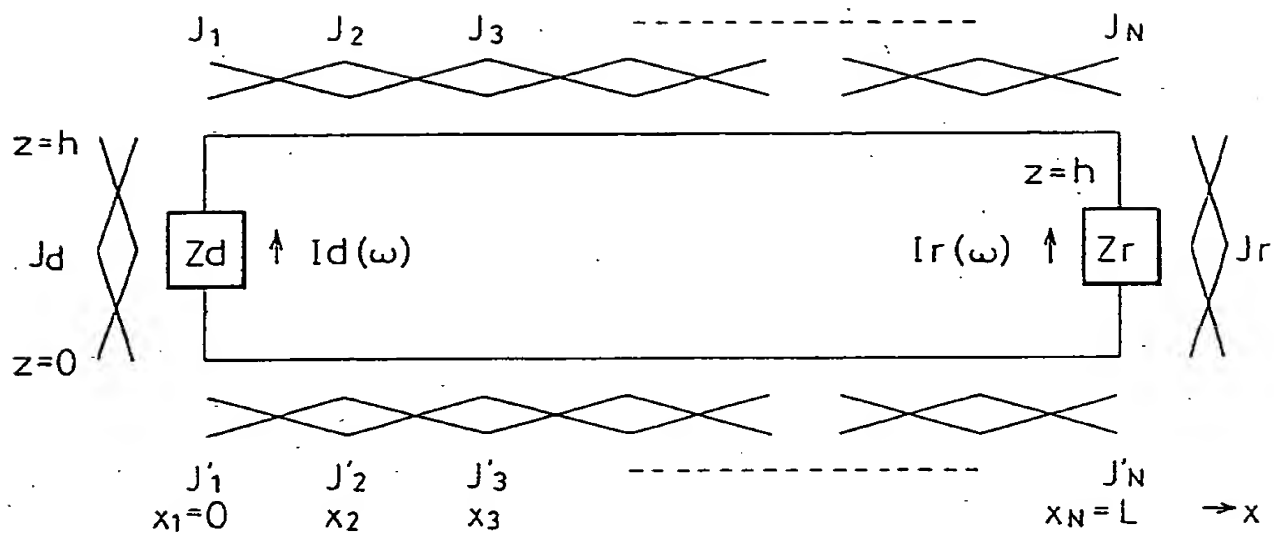


Fig.33



$$\text{Fig. 34} \left\{ \begin{array}{l} \int_0^L K(x) \sin \beta (x-L) dx = \sum_{n=1}^N [\sin \beta (x_n - L)] \sum_{m=1}^M (Z_{nm} - Z'_{nm}) [m] \\ \int_0^L K(x) \cos \beta (x-L) dx = \sum_{n=1}^N [\cos \beta (x_n - L)] \sum_{m=1}^M (Z_{nm} - Z'_{nm}) [m] \\ \int_0^b E z' (0, z) dz = \sum_{m=1}^M Z_{dm} [m], \quad \int_0^b E z' (L, z) dz = \sum_{m=1}^M Z_{rm} [m] \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{aligned}
 I_d(\omega) = & -j \frac{Z_r}{D} \int_0^L K(x) \sin \beta(x-L) dx - j \frac{Z_o}{D \beta} \int_0^L \frac{d}{dx} K(x) \sin \beta(x-L) dx \\
 & + j \frac{Z_o}{D \beta} K(0) \sin \beta L - \frac{Z_o}{D} \int_0^L E_z'(L, z) dz \\
 & + \frac{Z_o \cos \beta L + j Z_r \sin \beta L}{D} \int_0^L E_z'(0, z) dz
 \end{aligned} \right\} \text{Term A}$$

Fig. 35

Fig. 36A 
$$A = \int_0^L \frac{d}{dx} K(x) \sin \beta (x-L) dx = K(0) \sin \beta L - \beta \int_0^L K(x) \cos \beta (x-L) dx$$

Fig. 36B 
$$\left\{ \begin{aligned} I_d(\omega) = & -j \frac{Z_r}{D} \int_0^L K(x) \sin \beta (x-L) dx + j \frac{Z_o}{D} \int_0^L K(x) \cos \beta (x-L) dx \\ & - \frac{Z_o}{D} \int_0^L E_z'(L, z) dz + \frac{Z_o \cos \beta L + j Z_r \sin \beta L}{D} \int_0^L E_z'(0, z) dz \end{aligned} \right.$$

$$\left. \begin{aligned} I_r(\omega) &= \frac{Z_d \cos \beta L + j Z_o \sin \beta L}{D} \int_0^L K(x) \sin \beta (x-L) dx \\ &- j \frac{Z_o \cos \beta L + j Z_d \sin \beta L}{D \beta} \int_0^L \frac{d}{dx} K(x) \sin \beta (x-L) dx \\ &+ j \frac{Z_o \cos \beta L + j Z_d \sin \beta L}{D \beta} K(0) \sin \beta L + \frac{Z_o}{D} \int_0^L E_z'(0, z) dz \\ &- \frac{Z_o \cos \beta L + j Z_d \sin \beta L}{D} \int_0^L E_z'(L, z) dz \end{aligned} \right\} \text{Fig. 37}$$



$$\text{Fig. 38} \left\{ \begin{aligned} I_r(\omega) &= \frac{Z \cos \beta L + j Z_0 \sin \beta L}{D} \int_0^L K(x) \sin \beta (x-L) dx \\ &+ j \frac{Z_0 \cos \beta L + j Z \sin \beta L}{D} \int_0^L K(x) \cos \beta (x-L) dx \\ &+ \frac{Z_0}{D} \int_0^L E_z'(0, z) dz - \frac{Z_0 \cos \beta L + j Z \sin \beta L}{D} \int_0^L E_z'(L, z) dz \end{aligned} \right.$$

Fig. 39A

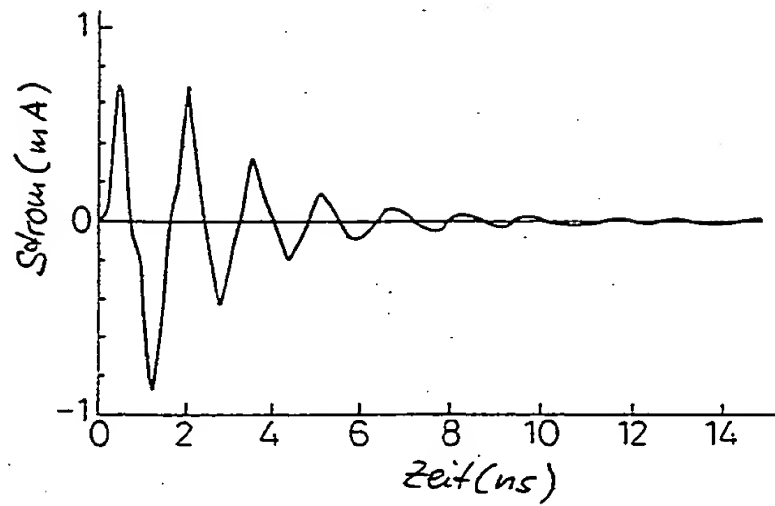


Fig. 39B

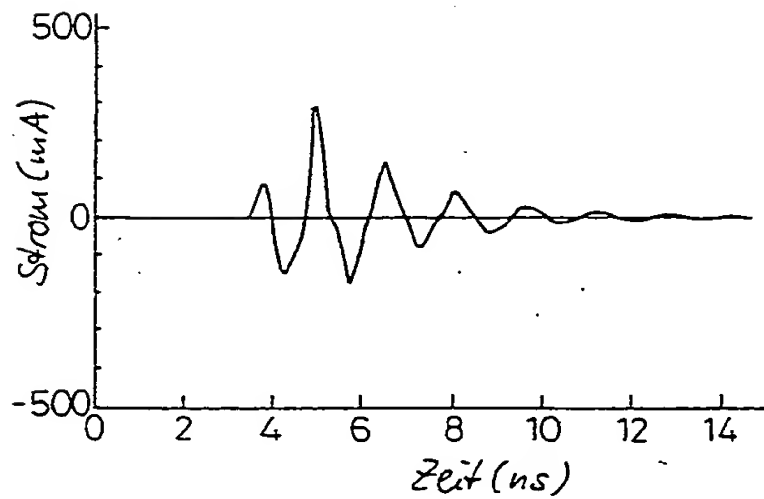


Fig. 40

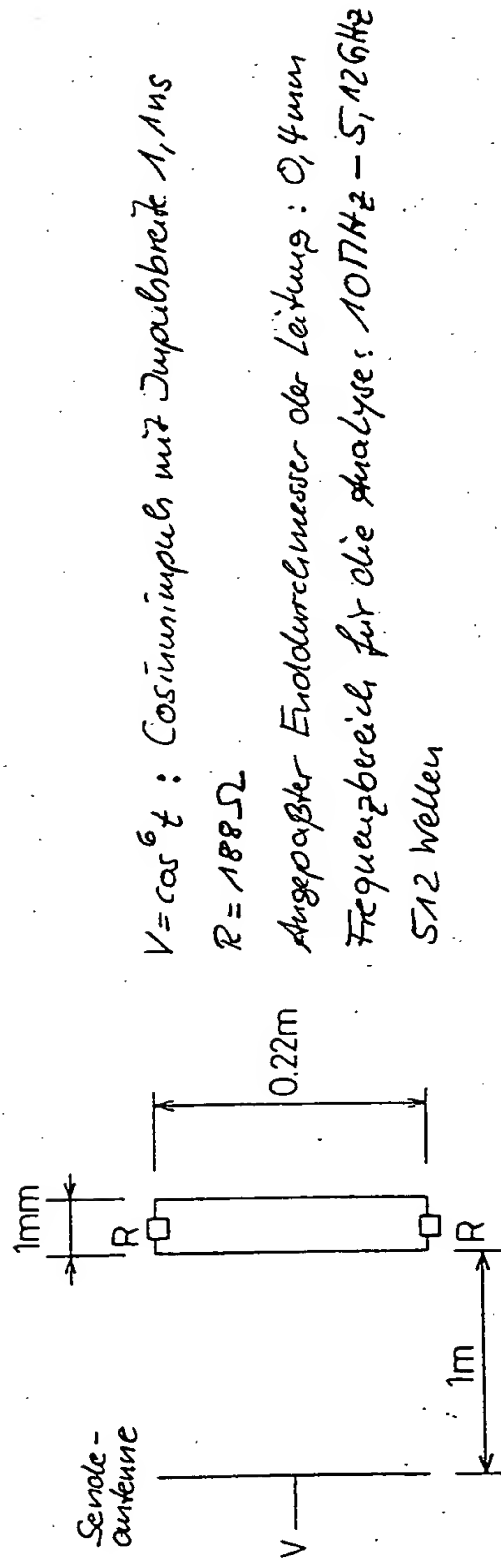


Fig. 41

$$\begin{bmatrix} Z^0 c, c \\ Z^0 d, c \\ B^0 d, c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z^0 c, d \\ Z^0 d, d \\ B^0 d, d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B^0 c, d \\ B^0 d, d \\ Y^0 d, d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z^d d, d \\ B^d d, d \\ Y^d d, d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B^d d, d \\ Y^d d, d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_c, n \\ I_d, n \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Fig. 42

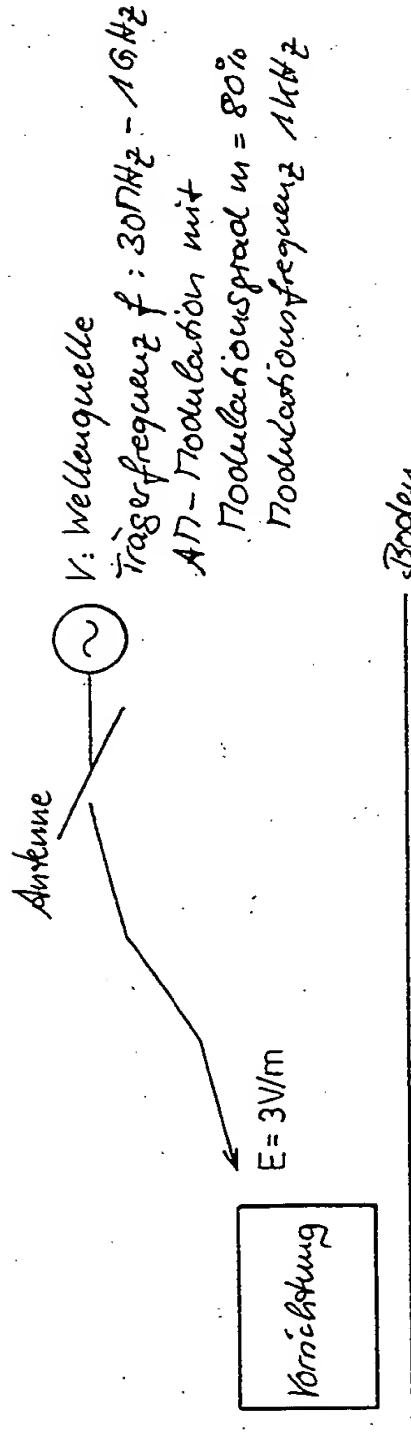


Fig. 43

<p>Für die Normierungsmethode (verwendete Eingaben der Wellenquelle)</p>			Wellenquelle 1:	$V_c \sin \omega_c t$	Spannung	$V_c$	Frequenz	$f_c$
			Wellenquelle 2:	$\frac{mV_c}{2} \cos(\omega_c - \omega_m) t$		$j \frac{mV_c}{2}$		$f_c \cdot 10^{-3}$
			Wellenquelle 3:	$\frac{mV_c}{2} \cos(\omega_c + \omega_m) t$		$-j \frac{mV_c}{2}$		$f_c \cdot 10^{-3}$
								$\omega_c = 2\pi f_c$

$$\text{Fig. 44 A} \left\{ \begin{array}{l} a_{m1} + j b_{m1} = I_{m1} \exp(j \phi_1) \\ \tan \phi_1 = b_{m1} / a_{m1} \\ a_{m2} + j b_{m2} = I_{m2} \exp(j \phi_2) \\ \tan \phi_2 = b_{m2} / a_{m2} \\ a_{m3} + j b_{m3} = I_{m3} \exp(j \phi_3) \\ \tan \phi_3 = b_{m3} / a_{m3} \end{array} \right.$$

$$\text{Fig. 44 B} \left\{ \begin{array}{l} I_{m1} \sin(\omega_c t + \phi_1) \\ I_{m2} \sin[(\omega_c - \omega_m) t + \phi_2] \\ I_{m3} \sin[(\omega_c + \omega_m) t + \phi_3] \end{array} \right.$$

Fig.45

